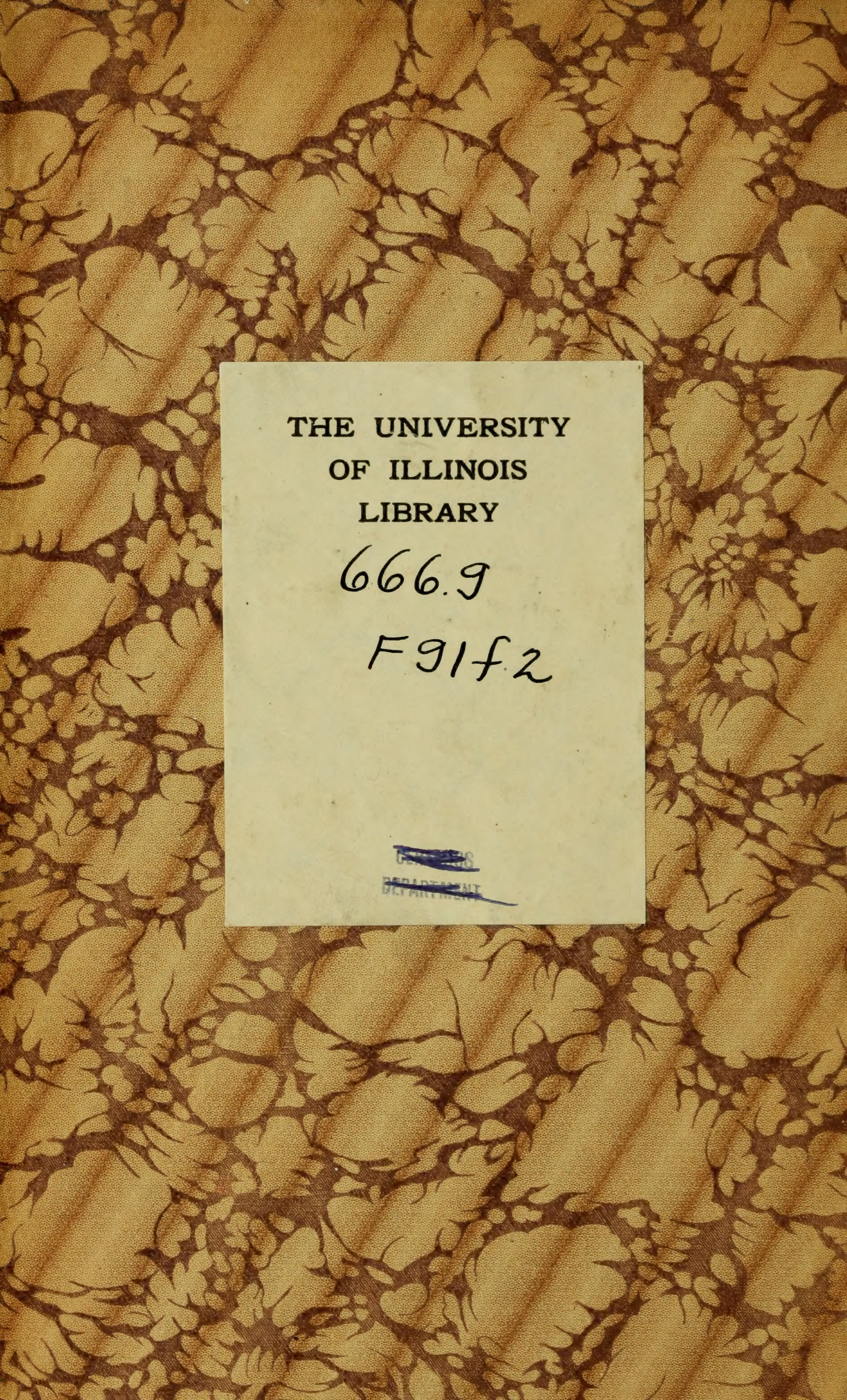
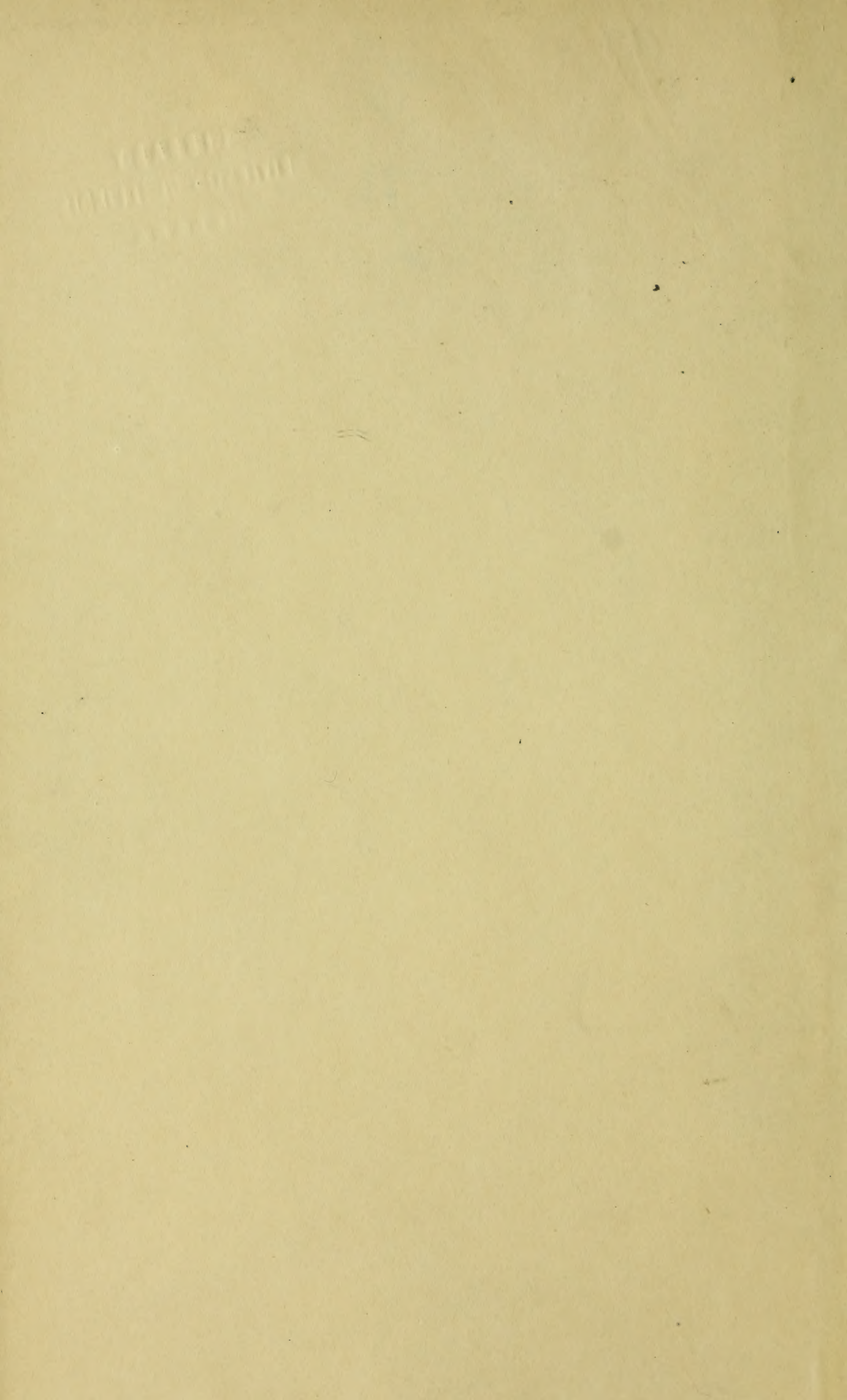










FABRICATION DU CIMENT



FABRICATION
DU CIMENT

CHAUX HYDRAULIQUE — CIMENT DE GRAPPIERS
CIMENT PORTLAND — CIMENTS POUZZOLANIQUES — CIMENT DE LAITIER
CIMENT PORTLAND DE FER — CIMENT DE LAITIER PORTLAND
MANUTENTION ET TRANSBORDEMENT ÉCONOMIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES
ET DES PRODUITS FABRIQUÉS — ANALYSES DES MATIÈRES PREMIÈRES
ET DES PRODUITS FABRIQUÉS
CONTRÔLE CHIMIQUE DE LA FABRICATION

PAR

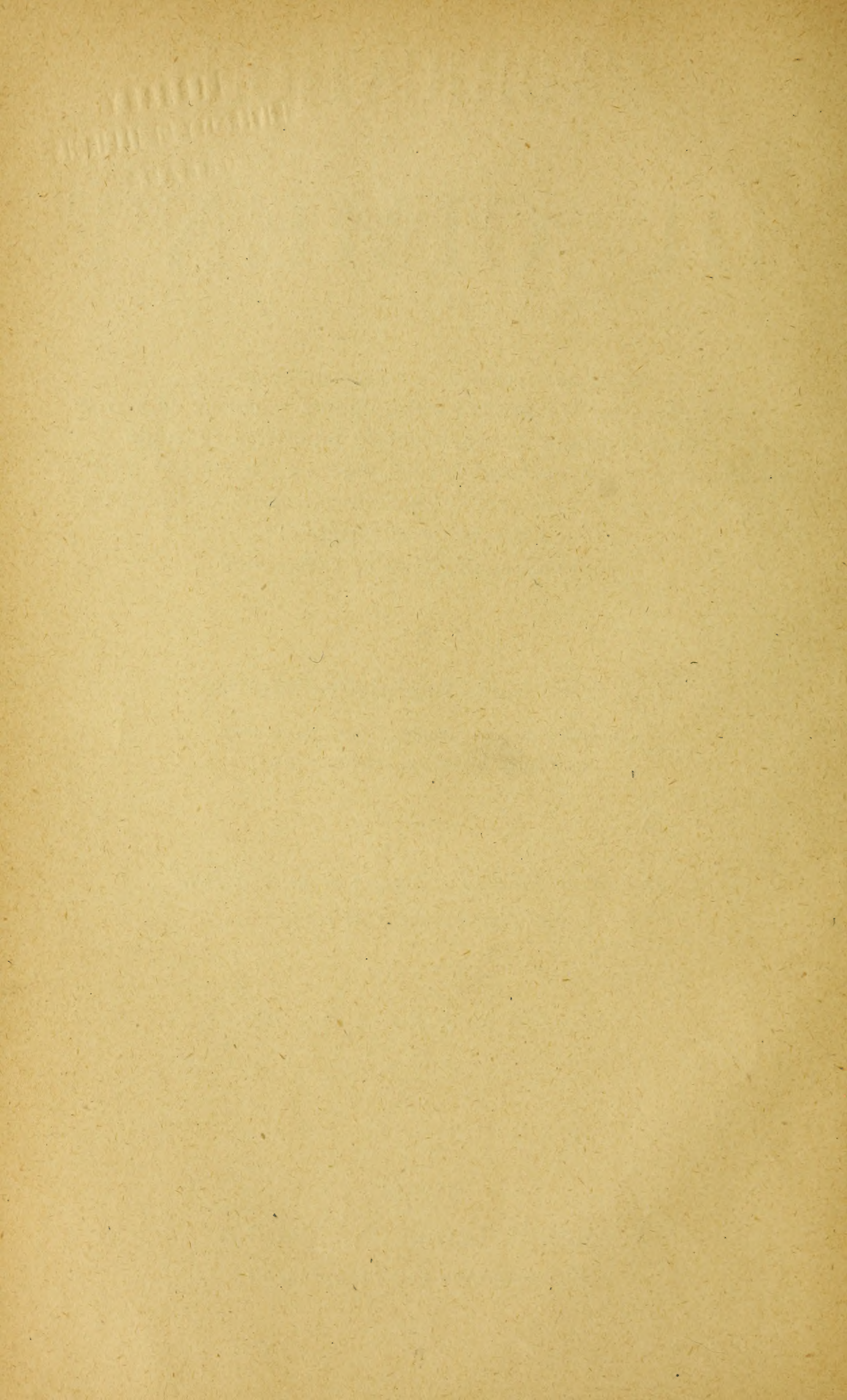
J. FRITSCH, Ingénieur-Chimiste

LAURÉAT DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
(MÉDAILLE D'ARGENT, MÉDAILLE D'OR)

Deuxième Edition refondue et mise à jour
186 figures dans le texte

PARIS
AMÉDÉE LEGRAND, ÉDITEUR
93, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 93

1920



PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION

La fabrication du ciment d'après les procédés nouveaux est sans conteste une des industries les plus difficiles, de celles qui exigent le plus de ressources de la part du directeur d'usine. Nous ne sommes plus à l'époque où un simple « guide du chaufournier » pouvait à la rigueur suffire à éclairer le fabricant et à le guider dans ses opérations. L'introduction du four rotatif a profondément modifié l'ancien état de choses ; elle a eu comme corollaire la création d'une foule de machines nouvelles peu ou point connues en dehors des usines qui les emploient, et dont les plus anciennes seulement se trouvent mentionnées dans les ouvrages spéciaux.

Dans ces conditions le besoin se faisait sentir d'un ouvrage de fond sur la fabrication du ciment. Il eut été préférable, sans doute, que cet ouvrage fût écrit par un praticien. Mais, la rapide évolution prise par l'industrie du ciment dans ces dernières années, l'énorme développement donné à l'outillage et aux études publiées sur le sujet, ont singulièrement élargi le champ d'action de l'écrivain et mis les praticiens dans l'impossiblité de suivre le mouvement par eux-mêmes. Ces derniers, du reste, comme nous l'avons dit ailleurs, n'ont que rarement le temps d'écrire, et lorsqu'ils se hasardent à le faire, leur propre intérêt les oblige à masquer leur verbe sous des circonlocutions embarrassées, afin de ne pas trop se découvrir, et de dire juste assez pour faire voir qu'ils savent, mais trop peu pour dire ce qu'on voudrait qu'ils disent. En outre, pour se documenter utilement, écrire un ouvrage de fond qui sorte des banalités, du déjà vu, il faut avoir des ressources que seul possède un écrivain de profession.

Nous nous sommes efforcé de condenser dans notre travail la plus grande somme possible de renseignements théoriques et pratiques qui soient de nature à éclairer le fabricant de ciment.

L'étude des matières premières, leurs transformations successives et l'outillage employé pour les diverses opérations, font l'objet de descriptions sobres, mais complètes.

En dehors de la fabrication proprement dite, nous avons donné des monographies d'usines, qui constituent la partie vécue, la difficulté surmontée, le progrès accompli, variable suivant les circonstances de temps et de lieux. Et cette partie de l'ouvrage n'est pas la moins intéresante, car malgré la similitude des opérations dans les différentes usines qui mettent en œuvre des matériaux de composition identique, celles-ci différent considérablement les unes des autres, la création de chacune d'elles ayant présenté des difficultés particulières à vaincre.

La partie technique de notre ouvrage se termine par un chapitre très complet sur le transbordement et la manutention économiques des matières premières et des produits fabriqués. Les agissements de la C. G. T. obligent les fabricants à se prémunir contre les coalitions ouvrières ; l'outillage décrit dans ce chapître leur en fournit le moyen.

La chimie est, pour l'industrie du ciment, une auxiliaire indispensable, et il nous a paru utile de consacrer un chapitre spécial à l'analyse des matières mises en œuvre et au contrôle de la fabrication, non que nous ayions la prétention d'apprendre leur métier aux chimistes de nos usines, qui forment l'élite de la jeune école, mais simplement pour attirer leur attention sur les points essentiels.

Enfin, nous avons reproduit à la fin du volume diverses notes dont l'insertion dans le cours de l'ouvrage aurait alourdi le texte et ralenti la lecture.

Ainsi présenté, notre travail diffère considérablement des ouvrages publiés jusqu'à présent ; nous avons la confiance qu'il répondra pleinement aux exigences de l'industrie du ciment.

En terminant, nous tenons à remercier ici les spécialistes qui nous ont secondé dans notre travail, et tout spécialement l'ingénieur Dr Dreyer pour la bienveillance qu'il a apportée à la lecture de notre manuscrit et à la correction des épreuves.

Paris, le 25 novembre 1910. L'AUTEUR.

PRÉFACE DE LA DEUXIÈME ÉDITION

La première édition de notre ouvrage a été enlevée rapidement. C'est le meilleur éloge que nos lecteurs aient pu lui décerner. Nous les en remercions en toute sincérité. Nous remercions également ceux d'entre eux qui ont bien voulu nous exprimer leur satisfaction par lettres, auxquelles, vu leur grand nombre, la marche des événements nous a empêché de répondre.

La guerre qui, dans l'ordre politique, économique et social a bouleversé tant de choses, a eu fatalement sa répercussion sur l'industrie du ciment. Aux difficultés d'ordre général, elle a vu se joindre celles résultant de la pénurie de charbon, — crise de quantité et crise de qualité, — et de la pénurie de main-d'œuvre : la pénurie de charbon faisait du four rotatif un outillage très coûteux eu égard à sa forte consommation de combustible de choix ; la pénurie de main-d'œuvre ne faisait qu'accentuer les défauts de l'ancien four droit en les aggravant. Pour remédier aux graves inconvénients inhérents aux deux méthodes de cuisson du ciment, inconvénients qui avaient d'ailleurs attiré l'attention des spécialistes dès avant la guerre, le moyen le plus simple était de reprendre l'étude de l'ancien four à cuve, de le modifier et de le perfectionner au point de le guérir de ses tares spécifiques. C'est chose faite maintenant. Les fours droits des nouveaux systèmes fonctionnent d'une manière absolument automatique; ils atteignent d'emblée le double but cherché : la possibilité de réduire considérablement la dépense de combustible et de main-d'œuvre, tout en supprimant les coulées d'incuits. Ainsi, le four rotatif que, il y a dix ans, on considérait comme un facteur essentiel de progrès dans l'industrie du ciment, se voit détrôné à son tour par son aîné, ce qui montre une fois de plus que dans la marche d'une industrie rien de définitif ne s'impose d'une manière durable.

Nous avons tenu largement compte des innovations précitées, qui, sans supplanter positivement le four rotatif, paraissent appelées à prendre un certain développement. Nous avons tenu compte également des autres travaux qui ont été publiés sur le

ciment dans ces dernières années, et enrichi notre texte de nombreux schémas relatifs à certains détails de la fabrication ; de telle sorte que, tout en supprimant un grand nombre de gravures de la première édition, nous avons dû augmenter notre texte d'une centaine de pages, malgré la cherté scandaleuse du papier. Nous espérons que cette nouvelle Edition donnera satisfaction à nos lecteurs, en même temps qu'à notre jeune et vaillant Editeur, ex-capitaine au 103e, mutilé au mont Kemmel.

Paris, le 5 juillet 1920. L'AUTEUR.

PRINCIPAUX OUVRAGES CONSULTÉS

CANDLOT. — **Chaux et Ciments.** Paris, Librairie Béranger.

H. LE CHATELIER. — **Bulletin de la société d'Encouragement.** Paris. Collection.

CARL NASKE. — **Die Portlandzementfabrikation.** 3e édition, Théod. Thomas. Leipzig, 1914.

Dr SCHOCH. — **Die moderne Aufbereitung der Mörtelmateralien.** 3e édition. Edité par la *Tonindustrie Zeitung*, Berlin.

RICHARD K. MEADE. — **Portland Cement.** Its composition, Raw Materials, Manufacture, Testing and Analysis. Edité par *The Chemical Publishing C°*, à Easton (Pa), Etats-Unis.

Tonindustrie Zeitung. Berlin, organe de l'association des fabricants de ciment allemand.

Revue des Matériaux de Construction. Administrateur, F. Margery, 148, boulev. Magenta, Paris.

Moniteur Scientifique du Dr Quesneville, Paris. Collection.

Chemiker Zeitung. Collection.

Journal of the Soc. of Chemical Industry, Londres.

Journal of the American Soc. of Chemical Industry.

O. DAMMER. — **Handbuch der chemischen Technologie.** Ferd. Enke, à Stuttgart.

Dr FERD. R. v. ARLT. — **Laboratoriumsbuch fur die Cementindustrie.** Wilhelm Knapp, Halle-s/-Saalle, 1910.

Mitteilungen aus dem Laboratorium des Vereins deutscher Portlandzementfabrikanten. Die Ergebnisse der Jahresprüfungen der Vereinszemente. Von Dr Framm.

PASSOW. — **Die Hochofenschlake in der Zementindustrie.** 1908.

TORNEBOHM. — **Ueber die Petrographie des Portlandzementes. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure,** années 1905 et 1910.

Dr MAX FIEBELKORN. — **Hydraulischer Kalk und Zement in Sud-Frankreich.** Edité par la *Tonindustrie Zeitung*, Berlin.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE PREMIER

CHAUX HYDRAULIQUES ET CIMENTS

CHAPITRE II

LE CIMENT PORTLAND

CHAPITRE III

LES MATIÈRES PREMIÈRES DU CIMENN PORTLAND ET DES CIMENTS POUZZOLANIQUES

CHAPITRE IV

PROCÉDÉS DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND

CHAPITRE V

PRÉPARATION DES MATIÈRES PAR VOIE SÈCHE

CHAPTRE VI

LA CUISSON DU CIMENT

CHAPITRE VII

MOUTURE DES CLINKERS. — SILOTAGE ET ENSACHAGE DU CIMENT

CHAPITRE VIII

CIMENT DE LAITIER, CIMENT PORTLAND DE FER ET CIMENT DE LAITIER PORTLAND

CHAPITRE IX

CHAPITRE X

APPAREILS AUXILIAIRES DE TRANSPORT

CHAPITRE XI

APPAREILS DE DÉPOUSSIÉRAGE

CHAPITRE XII

DESCRIPTION D'USINES A CIMENT

CHAPITRE XIII

PROPRIÉTÉS DU CIMENT PORTLAND ET MÉTHODES D'ESSAI

CHAPITRE XIV

ANALYSE CHIMIQUE DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES PRODUITS FABRIQUÉS

ANNEXES

NOTES DIVERSES SUR LE CIMENT PORTLAND ET ANNEXES

CHAPITRE PREMIER

CHAUX HYDRAULIQUES ET CIMENTS

NATURE DES CHAUX HYDRAULIQUES

Les chaux hydrauliques s'obtiennent par la cuisson, jusqu'à un commencement de scorification, des calcaires argileux ou mieux siliceux, renfermant moins de silice et d'alumine que les calcaires à ciment. Elles sont caractérisées par la propriété qu'elles ont de s'éteindre comme la chaux, ce qui dispense de les pulvériser mécaniquement avant leur emploi. La proportion de chaux libre restant après la cuisson doit être suffisante pour que son extinction amène la désagrégation complète de la masse sans l'intervention d'aucun procédé mécanique. Par l'extinction la chaux caustique libre se transforme en hydrate de chaux pulvérulent, auquel se trouve mélangé tout ou partie des éléments hydraulisants, suivant la nature physique et chimique de la matière et la réussite de la cuisson. Parfois cependant, une partie de ces éléments reste en gros morceaux; il est alors nécessaire de soumettre la chaux éteinte à un broyage convenable, ainsi que nous le verrons plus loin.

Les chaux hydrauliques connues comprennent :

1° Les chaux hydrauliques proprement dites, contenant plus de 70 % de carbonate de chaux;

2° Les ciments romains, contenant 50 à 70 % de carbonate de chaux; et

3° Les ciments dolomitiques ou magnésiens.

La fabrication de ces trois sortes de chaux hydrauliques est assez simple. La matière première, concassée en morceaux de la grosseur du poing, est chargée directement dans le four et soumise à la cuisson de la même manière que le ciment Portland, mais à une température moins élevée.

La chaux hydraulique proprement dite est alors prête pour être expédiée, tandis que le ciment romain et le ciment dolomitique sont préalablement réduits en poudre fine par des moyens mécaniques et expédiés en sacs.

CHAUX HYDRAULIQUES PROPREMENT DITES ET CIMENTS

Les chaux hydrauliques proprement dites contiennent 18 à 25 % d'argile, de la silice libre et en partie combinée, de l'alumine, de l'oxyde de fer et un peu de magnésie et d'alcali. Elles sont d'autant meilleures qu'elles renferment moins de silice libre et plus de silice combinée avec les autres éléments de l'argile, et moins de silice sous forme de quartz. Celui-ci, à l'état de sable de grosseur moyenne, est inerte et ne forme qu'un ballast, attendu qu'il n'est pas solubilisé par la cuisson.

La cuisson des chaux hydrauliques doit être faite avec les plus grands soins. Plus est élevée leur teneur en silicates totaux, moins doit être élevée la température de cuisson. Il ne doit pas s'y produire de scorification, comme dans le ciment Portland, car les morceaux scorifiés sont surcuits et ne s'hydratent que très lentement et incomplètement. Il ne faut donc pousser la cuisson que jusqu'à l'expulsion de l'acide carbonique. La chaux caustique, fortement basique, qui se forme alors réagit sur l'argile, la solubilise et forme avec elle du silicate de chaux.

La chaux hydraulique fournit un mortier d'autant plus dense et plus solide que la pierre calcaire réunit elle-même ces qualités. Elle se distingue du ciment romain par sa teneur plus élevée en carbonate de chaux et par ce fait qu'elle se laisse éteindre avec de l'eau, quoique plus lentement que la chaux grasse.

La chaux hydraulique du Teil, une des marques les plus connues, a la composition suivante d'après le Dr Michaelis :

Perte à la calcination	6,424
Silice	22,588
Alumine	2,629
Oxyde de fer	0,837
Chaux	65,624
Magnésie	1,536
Potasse	0,124
Soude	0,065
Acide sulfurique	0,523

Elle se distingue par sa résistance remarquable à l'action de l'eau de mer, due à sa composition (silicate de chaux presque pur).

Cependant, il existe aussi des chaux à teneur relativement faible en silice, mais riches en alumine, qui fournissent également de bons mortiers hydrauliques. La proportion de silice : alumine est de 9 : 1 dans la chaux du Teil, tandis qu'elle n'est que de 2,3 : 1 dans la chaux de Beocsin; or, ces deux produits sont typiques et constituent les chaux hydrauliques les plus estimées.

La chaux hydraulique en poudre a une granulation terreuse jaunâtre avec tons gris ou bruns-rougeâtres. Elle ne s'échauffe pas au gâchage avec de l'eau; elle est à prise lente, qui dure souvent 24 heures et plus, et possède la propriété de se durcir de plus en plus avec le temps et de ne changer de volume ni à l'air ni sous l'eau. Son poids spécifique est le plus souvent inférieur à 2,9; sa perte à la calcination est généralement supérieure à 8 %. Elle peut être employée aux constructions à l'air ou sous l'eau qui n'exigent pas une très grande solidité initiale et finale, ni une résistance à la gelée dans les premières phases de durcissement. Pour les constructions sous l'eau, la chaux hydraulique ne doit être employée que si le mortier a le temps suffisant pour se durcir avant d'être immergé. Ce mortier (1 : 3), ayant fait prise à l'air et étant placé ensuite sous l'eau, donne les résistances suivantes :

Au bout de	7 jours	28 jours	365 jours
A la traction	4 kg,5	7 kg	21 kg
A la compression	25 kg	48 kg	135 kg

Pour contrôler l'invariabilité de volume, on soumet la chaux hydraulique à l'action de la vapeur ou de l'eau chauffée à 50° C : si au bout de 6-8 heures, les éprouvettes sous forme de galettes n'accusent ni déformation, ni crevasses sur les bords ou à la surface par suite d'une extinction complémentaire lente qui se produit dans les fragments incuits ou insuffisamment hydratés, la matière peut être considérée comme exempte d'expansion.

Si la masse n'est pas complètement homogène, on sépare à l'aide d'un tamis la poudre obtenue par extinction à sec des fragments résiduels, on soumet ces derniers au broyage fin et on mélange le produit à la poudre de chaux obtenue en premier lieu.

Dans ces dernières années la fabrication de la chaux hydraulique a été l'objet de perfectionnements qu'il est intéressant de

signaler, et dont le point de départ réside dans le broyage. L'introduction de la chaux hydraulique en poudre s'était heurtée tout d'abord à des difficultés qui provenaient surtout de la préparation un peu primitive de ce produit : la chaux était blutée sur des tamis à mailles trop grandes et il était impossible, dans ces conditions, d'obtenir un produit de première qualité, non expansif. A ce point de vue l'emploi du séparateur à air et du Sélecteur Pfeiffer dans l'industrie de la chaux hydraulique constitue un réel progrès, car cet appareil permet d'obtenir un produit de grande finesse, même lorsque la chaux est tellement humide qu'elle encrasse les tamis à mailles de gros calibre. Ceci est tellement vrai qu'on peut traiter dans le séparateur la chaux venant directement du tambour d'extinction, c'est-à-dire quand elle est encore chaude et humide.

Les avantages inhérents au séparateur Pfeiffer sont encore augmentés par le système de broyage introduit par la même maison et qui consiste à traiter tout d'abord dans le séparateur toute la masse de chaux éteinte, la chaux tout venant, de telle sorte qu'on n'envoie dans le broyeur que les particules qui ont besoin d'être broyées. L'introduction du broyeur Sélecteur, entraînant la suppression complète des tamis, a permis de donner à cette méthode de broyage tout le perfectionnement désirable.

La chaux hydraulique est l'objet d'applications nombreuses et importantes ; aussi, pour donner satisfaction aux exigences des consommateurs, on en fabrique différentes sortes dont nous indiquerons les plus typiques.

C'est dans le midi de la France que l'industrie de la chaux hydraulique est le plus développée; il suffit de citer les usines de la maison Pavin de Lafarge, les plus puissantes du monde, dont une seule, n'expédie pas moins de 100 wagons par jour. Ces usines seront décrites plus loin à titre de modèles.

Il y a des chaux faiblement hydrauliques (temps de prise variant entre 1 et 2 semaines), des chaux moyennement hydrauliques (temps de prise variant entre 48 heures et 1 semaine) et des chaux fortement hydrauliques (achèvement de la prise en moins de 36 heures).

Les ciments proviennent de la cuisson de mélanges naturels ou artificiels d'argile et de carbonate de chaux, sur lesquels l'eau

d'hydratation n'agit pas ou agit d'une manière très lente. Ils font prise sous l'eau en des temps variables suivant leur nature.

On a cru pendant longtemps en France que les chaux hydrauliques et les ciments étaient constitués de matières absolument différentes. L'événement a démontré que tel n'est pas le cas, mais que, entre le type chaux hydraulique et le type ciment il existe des produits intermédiaires en nombre presque illimité. Si le mélange est très riche en chaux, on obtient de la chaux hydraulique ordinaire, appelée aussi chaux légère. Si le nombre de grains de ciment augmente dans le mélange, on obtient de la chaux lourde. Si enfin la quantité de chaux diminue davantage dans le mélange, on obtient finalement du ciment proprement dit. Suivant la quantité d'éléments calcaires ou hydraulisants dans le mélange, le produit se rapprochera par ses propriétés de la chaux hydraulique ou du ciment proprement dit; il est dès lors facile de comprendre qu'il puisse exister des chaux hydrauliques offrant plus de résistance que certains mauvais ciments. Suivant leur mode de fabrication on distingue les ciments proprement dits et les ciments de grappier. Pour se faire une idée de ces derniers, il est nécessaire d'entrer dans le détail de la fabrication des chaux hydrauliques à laquelle ils se rattachent.

Fabrication de la chaux hydraulique

a) *Extraction de la pierre à chaux.* — La pierre à chaux est extraite des carrières qui sont généralement situées à proximité de l'usine. Sa couleur varie du jaune au bleu, en passant par toutes les nuances intermédiaires. Elle est très dense et forme souvent des gisements d'une grande puissance. Parfois aussi les couches sont marneuses et tellement variables dans leur composition chimique qu'on se voit finalement obligé de renoncer à les utiliser. Comme nous l'avons fait observer plus haut, on se sert des mêmes matières premières pour la fabrication de la chaux hydraulique et du ciment, avec cette différence que dans le premier cas on fait la cuisson à une température moins élevée que dans le second, où elle est poussée jusqu'à un commencement de scorification.

Pour l'extraction de la pierre à chaux, on se sert généralement de machines à forer pour percer dans la roche des ouvertures qu'on remplit ensuite d'explosifs tels que la poudre, la cheddite

et la solorite. Les blocs détachés par l'explosion sont brisés à leur tour soit à l'aide d'explosifs, soit à coups de maillet, puis les morceaux sont passés au concasseur et réduits en fragments. A l'usine de Guérigny (Nièvre) le concasseur est chargé à la main. La matière broyée tombe sur une grille inclinée : les menus débris passent entre les barreaux de la grille, tandis que les morceaux sont repris par un transporteur à godets et convoyés sur la plateforme des fours. Dans d'autres usines, comme à Bans près de Nice et chez Lafarge, les morceaux sont convoyés au concasseur au moyen d'un transporteur à secousses.

b) *Cuisson.* — Dans la fabrication de la chaux hydraulique et du ciment la cuisson est une des opérations les plus importantes. Si l'on se conformait simplement à la théorie, on se contenterait de pousser la température de cuisson de la chaux à environ 900° : à cette température tout l'acide carbonique serait éliminé et la chaux, ainsi cuite à point, constituerait alors la chaux légère. Mais, dans la pratique il en est tout autrement par suite même de l'inégalité de la température dans les différentes zônes du four, d'où il suit que certaines parties de la matière sont cuites à une température plus basse, d'autres à une température plus élevée. On obtient dès lors trois sortes différentes de chaux, déjà mentionnées plus haut : de la chaux légère ou ordinaire, de la chaux lourde et du ciment de grappier.

Les fours généralement employés sont les fours à entonnoir dont l'intérieur est de forme ovoïde et dont on règle le tirage au besoin à l'aide d'un ventilateur ou d'un aspirateur. Mais, on rencontre également d'autres systèmes de fours, tels que le four Aalborg, le four à creuset, le four Perpignani-Candlot, le four Steiger et le four à gaz de Fichet et Heurtey. Nous décrirons ces derniers plus loin. Les fours sont ordinairement disposés en batterie ; la plateforme qui les dessert est établie de telle sorte que les morceaux de pierre à chaux puissent y être amenés de la carrière sans aucune difficulté. Comme combustible on emploie de la houille, de l'anthracite ou du coke.

Il est de la plus haute importance de bien surveiller la marche des fours, la chaux devant être cuite différemment suivant qu'elle contient plus ou moins d'argile. Supposons que la chaux ait la composition suivante (Leduc) :

SiO^2	10,25
Al^2O^3	0,82
Fe^2O^3	0,58
CaO	48,35
MgO	0,60
SO^3	0,17
Perte au feu	39,20
Non dosé	0,30

Suivant la température à laquelle on la fait cuire on obtient une chaux légère ou un ciment ayant la composition suivante :

	Chaux	Ciment
Insoluble	0,15	1,10
SiO^2 combiné	4,35	19,40
Al^2O^3	2,35	4,30
Fe^2O^3	1,50	2,30
CaO	67,40	64,00
MgO	0,90	0,86
SO^3	1,00	0,75
Perte au feu	13,20	7,25
Non dosé	0,05	0,04

Les résistances à la traction des deux produits transformés en mortier plastique, fournissent les résultats suivants :

	Chaux	Ciment
Après 2 jours	0,5 kg	5,5 kg
» 1 semaine	4,8 »	11,8 »
» 4 semaines	8,8 »	16,8 »
» 12 semaines	12,5 »	18,5 »
» 6 mois	15,3 »	24,0 »

c) *Extinction.* — La chaux cuite qu'on retire du bas du four forme un mélange de morceaux cuits normalement et de morceaux surcuits et d'une importante proportion de poudre. Il s'agit maintenant d'éteindre la chaux et de transformer l'oxyde de calcium en oxyde hydraté pulvérulent. Cette opération est accompagnée d'une augmentation de volume et d'un dégagement de chaleur. L'extinction se fait immédiatement après l'extraction de la chaux du four; à cet effet, on arrose les produits chargés dans des wagonnets avec une quantité déterminée d'eau chaude ou froide. La chaux absorbe l'eau et commence à se déliter avec un fort dégagement de vapeur. L'extinction s'achève dans des silos dans lesquels on décharge les wagonnets et où la chaux séjourne pendant le temps nécessaire, soit environ 15 jours. Il est clair que la marche de l'extinction a une importance capitale et

qu'elle doit faire l'objet d'une étude spéciale dans chaque usine, à cause du danger d'expansion que présenterait le mortier préparé avec une chaux incomplètement éteinte. Il arrive souvent qu'une chaux imparfaitement éteinte donne tout d'abord de grandes résistances, pour descendre ensuite à des résistances très faibles, par exemple de 20,3 kg au bout de 1 semaine à 3,5 kg au bout de 12 semaines. Dans certaines usines on se sert aussi de tambours extincteurs des systèmes Schulthess ou des Ateliers d'Arlod.

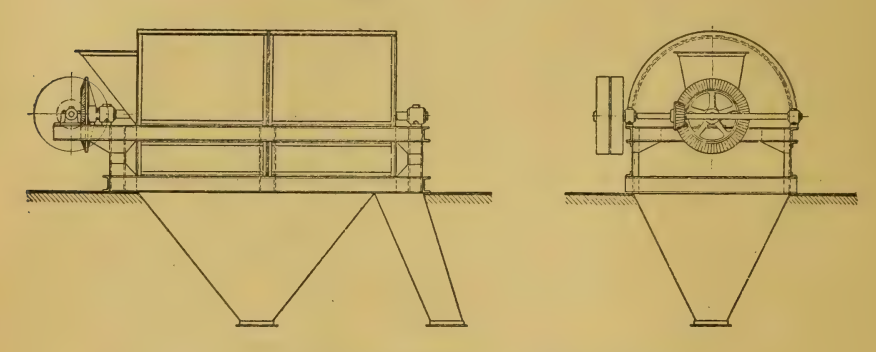


Fig. 1. — Extincteur à chaux des Ateliers d'Arlod (Ain)

d) *Chaux légère.* — Lorsque la chaux a séjourné dans les silos pendant le temps nécessaire à l'extinction, on l'en évacue et on la soumet au blutage afin de séparer la partie pulvérulente de la partie qui est restée à l'état de fragments. La partie pulvérulente se compose d'hydrate de chaux et forme la chaux hydraulique du commerce. Les fragments restés sur les tamis forment le second produit, surcuit, non éteint, non délité : ce sont les grappiers, qu'on transforme en ciment commercial par une série d'opérations qui seront décrites plus loin.

e) *Chaux lourde.* — Les grappiers sont encore recouverts d'une couche de chaux qui n'a pas été éteinte à la première hydratation et qui reste sur les tamis avec les grappiers. Il s'agit maintenant d'obtenir cette chaux séparément. A cet effet, les grappiers sont soumis à une nouvelle extinction. Par cette opération on obtient une chaux qui est plus lourde que la chaux hydraulique ordinaire et qui pour ce motif est appelée chaux lour-

de. On ne réussit pas toujours à séparer toute la chaux des grappiers par cette seconde extinction, et il est alors nécessaire de recourir à une troisième extinction. La chaux ainsi obtenue est également de la chaux lourde qu'on mélange avec celle qu'on a récupérée par la seconde extinction.

f) *Grappiers.* — On a donc finalement les grappiers à un état relativement pur, débarrassés de la chaux par les extinctions et les blutages successifs. Comme ils ne sont autre chose en réalité que le produit de la cuisson jusqu'à scorification d'un mélange de chaux et d'argile, il ne reste plus qu'à leur faire subir les mêmes opérations qu'au clinker de ciment pour les transformer

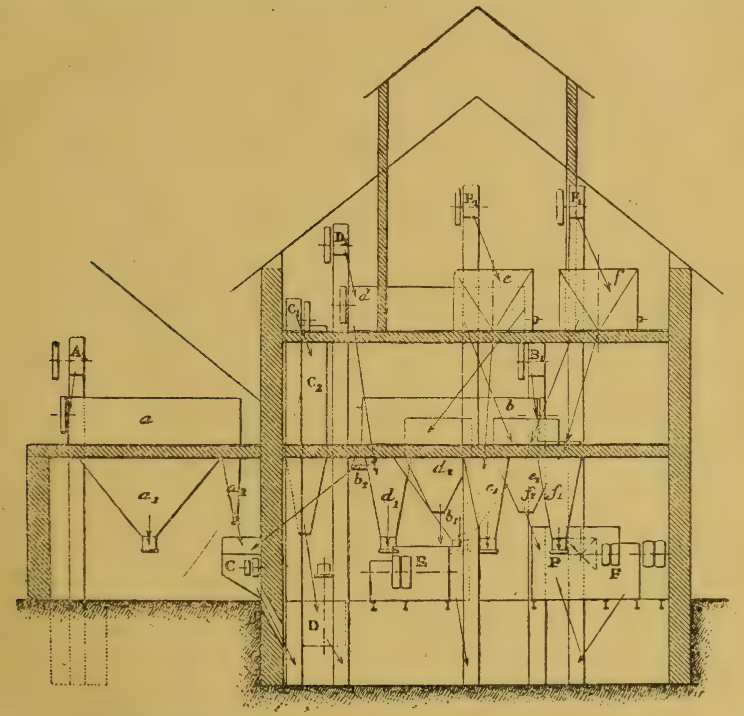


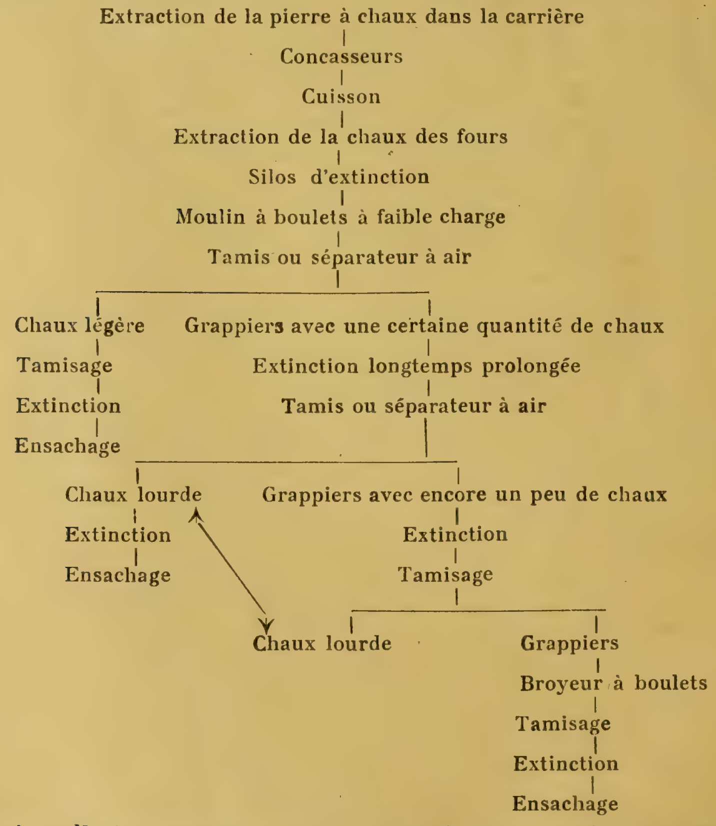
Fig. 2. — Vue schématique de l'installation pour le travail des grappiers

en ciment commercial. On les soumet donc au broyage à l'aide de broyeurs à boulets ou de tubes broyeurs, on blute le produit et on loge la poudre obtenue dans des silos où elle séjourne jusqu'au moment de l'expédition.

Il est clair, en effet, que même en cas de fortes demandes ce

ciment de grappiers ne doit pas être ensaché immédiatement; il est indispensable de l'emmagasiner pendant quelque temps afin d'éviter le phénomène d'expansion dans la suite.

g) *Marche du travail dans son ensemble.* — Leduc donne plusieurs schémas pour l'ensemble des opérations; nous en reproduisons le plus compliqué. Quand on visite pour la première fois une fabrique de chaux hydraulique et de ciment de grappiers, on a tout d'abord l'impression de se trouver en présence d'une fabrication excessivement compliquée, mais on ne tarde pas à y voir clair du moment qu'on a bien compris le schema.



Une installation typique pour le travail des grappiers se trouve à St-Germain, près Jouet-sur-l'Aubois (Cher); la description en est donnée par M. Laborbe. Les grappiers sont élèves des silos d'extinction dans les tamis A $\frac{a}{a^1 \quad a^2}$. La production journa-

lière est de 120 t. qui se décomposent en 80 t. de chaux pesant 650gr. par litre et 40 t. de grappiers qui restent comme résidu au bout d'une durée d'extinction de 10-12 jours. Ces grappiers tombent dans le concasseur C, et de là ils se rendent dans la cuvette d'un élévateur qui les déverse dans le silo c^2. De là ils tombent dans le broyeur Vapart D, d'où un élévateur D^1 les transporte aux tamis $\frac{d}{d^1 \ d^2}$ Là on en sépare 15 t. de chaux à 750 gr. par litre. Les autres 25 t. se rendent de d^2 au broyeur vertical de Morel, et de là au moyen de l'élévateur E^1 au tamis *e* qui sépare 12 t. de chaux pesant 900 gr. par litre. Les 13 t. restantes se rendent au silo c^2, qui est desservi par deux broyeurs horizontaux de Morel F. On obtient finalement 13 t. d'un ciment d'une grande finesse pesant 1.100 gr. par litre. Les silos c^2 d^2 e^2 dans lesquels les broyeurs fins déversent leur produit ont une capacité suffisante pour un travail de 2-3 jours. L'air atmosphérique y a libre accès afin de favoriser autant que possible par son humidité la marche de l'extinction.

Beaucoup d'usines du Midi ont installé le groupe du broyeur-séparateur de Pfeiffer, dont le fonctionnement est le suivant.

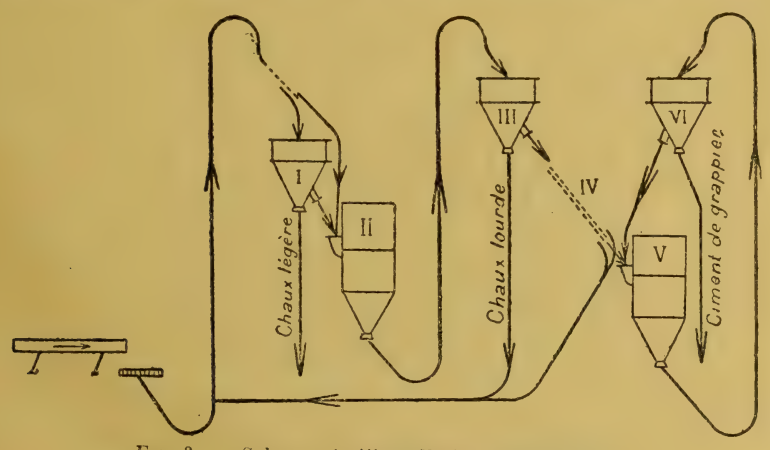


Fig. 3. — Schema de l'installation Pfeiffer pour le travail des grappiers

La chaux est amenée automatiquement du silo d'extinction dans le séparateur I. Au-dessus de ce séparateur se trouve une grille qui a pour but d'éliminer les gros morceaux non effrités

et de les conduire directement dans le broyeur décortiqueur II. La farine mélangée de grains dont la grosseur va jusqu'à celle d'une lentille, se rend dans le séparateur I qui en élimine la farine fine formée par l'extinction, tandis que les grains tombent dans le broyeur décortiqueur II. La poudre fine ainsi obtenue forme la chaux légère dont les propriétés hydrauliques sont les plus faibles; elle peut être ensachée directement. La chaux qui ne s'est pas effritée dans les silos est décortiquée dans le broyeur II (fig. 3) et traitée ensuite dans le séparateur III. La poudre fine du séparateur III est beaucoup plus lourde que celle qui sort du séparateur I et possède des propriétés hydrauliques plus accentuées; elle forme la *chaux lourde*. Les sablettes du séparateur III se rendent dans la grille IV qui les sépare en trois grosseurs : les grains les plus gros retournent dans le broyeur décortiqueur II, de même que les grains les plus fins. Le produit de grosseur moyenne, en grains de 1,5 mm. de diamètre, se compose de particules scorifiées et forme les *grappiers*. Les grappiers contenus dans le produit le plus gros sont broyés dans le broyeur II et séparés



Fig. 4. — Figure microscopique comparative du ciment Portland (à gauche) et du ciment des grappiers (à droite)

ensuite par la grille dans la suite du travail. Les grappiers séparés par le trieur IV, qui dans certains cas sont emmagasinés pendant un certain temps, sont soumis au broyage fin dans le broyeur V combiné avec le séparateur VI.

En outre, on a adopté des dispositifs qui permettent de préparer à tout moment des mélanges de chaux légère, de chaux lourde et de ciment de grappier en toutes proportions, suivant les prescriptions de la clientèle. Ainsi, par exemple, on peut tirer d'une même fabrication de la chaux hydraulique légère et du ciment en mélangeant une partie de chaux lourde avec la chaux légère et une autre partie avec le ciment de grappier.

Il n'est guère facile de donner des règles invariables pour la fabrication du ciment de grappier, car la nature des matières premières varie dans des limites très étendues non seulement d'une carrière à l'autre, mais encore dans une seule et même carrière.

Pour obtenir un produit de bonne qualité, il est très important de soigner tout d'abord la cuisson, ensuite l'extinction de la chaux. Comme nous l'avons fait observer plus haut, l'extinction peut s'effectuer aussi bien à l'aide de machines que dans des silos. Ce dernier procédé est beaucoup employé, parce qu'il permet de laisser la chaux se refroidir lentement, de la conserver plus longtemps, ce qui peut être utile par suite de la marche très inégale des expéditions. Lorsque la demande se ralentit, on peut continuer à fabriquer sans restreindre la production, puisque les silos reçoivent les excédents. Ensuite, le broyage fin de la chaux est au moins aussi important que l'extinction, car il est hors de doute que les exigences sans cesse croissantes des acheteurs augmenteront encore à l'avenir. La chaux hydraulique est contrôlée actuellement à l'aide d'un tamis à mailles assez grandes; mais, il y a tout lieu de supposer qu'on ne tardera pas à adopter pour cela le tamis à 5000 mailles comme dans l'industrie du ciment, et qu'une chaux donnant plus de 10 % de refus sur ce tamis (taux qui correspond actuellement à la finesse normale du ciment) sera alors considérée comme trop grosse.

Il est d'ailleurs démontré que, tout comme le ciment, la chaux finement broyée est plus avantageuse à l'emploi et donne plus de garantie contre l'expansion, car ce sont le plus souvent les gros grains, composés de particules non éteintes ou surcuites, qui donnent de l'expansion dans les mortiers après la prise. Cet inconvénient se présente souvent dans le revêtement des murs, pour lesquels la chaux hydraulique convient d'ailleurs très bien; il peut en résulter un discrédit qui jaillit sur l'industrie tout entière.

Mentionnons également le sélecteur, nouveau séparateur à air qui permet d'obtenir de la chaux à une finesse inconnue jusque là. Le ciment ainsi obtenu est de 60 % plus résistant que le ciment ordinaire; en d'autres termes, il donne sous forme de mortier une augmentation de résistance allant jusqu'à 140 kg au bout de 28 jours.

FABRICATION DE CHAUX HYDRAULIQUE ET DE CIMENT AUX USINES DE LAFARGE ET DU TEIL

La Société Pavin de Lafarge possède au Teil une carrière d'une grande richesse, s'étendant dans une direction rectiligne sur une longueur de 1.000 m. avec une hauteur moyenne de 100 m. Trois bancs de 30 m. d'épaisseur sont exploités pour la fabrication de la chaux hydraulique et du ciment; ils se distinguent par une remarquable uniformité dans la composition chimique. La teneur en SiO^2 varie entre 14 et 18 %, celle en CaO entre 44 et 48 %; Al^2O^3 ne s'y trouve qu'en faible proportion et ne dépasse pas 2 % ensemble avec Fe^2O^3.

L'extraction de la pierre à chaux se fait par étages. Pour creuser les trous de mine on se sert de machines à forer de la maison Albert François, Soc. an. à Sclessin lès Liège (Belgique). Ces machines fonctionnent d'une manière très correcte; on les préfère aux machines Ingersoll qui sont plus sensibles et plus sujettes à se déranger. On donne aux trous de mine une profondeur de 3,5 m., on fore 1 m. en 10 minutes et on fait en sorte de combiner ensemble 3-4 trous de forage. Les gros blocs détachés par les coups de mine sont divisés à leur tour par les mêmes moyens. L'extraction est d'environ 1.400 m³ de pierre par jour.

Les wagonnets chargés venant de la carrière sont pesés sur une balance automatique. Ils sont dirigés ensuite vers les concasseurs. Dans le chargement des wagonnets on fait en sorte de séparer les gros morceaux des menus éclats et des sablettes : les premiers sont chargés à la main, les seconds à la pelle. Les gros morceaux sont déversés dans un entonnoir dont l'ouverture inférieure exécute un mouvement de va et vient et règle automatiquement la quantité de pierre qui en sort. De là les pierres passent par le concasseur, d'où elles tombent sur une courroie transporteuse qui, avec une inclinaison de 18°, les élève dans un

tambour trieur, celui-ci sépare les morceaux utilisables des menus fragments et les trie en 4 grosseurs. Les premiers sont chargés dans les fours, les seconds sont évacués.

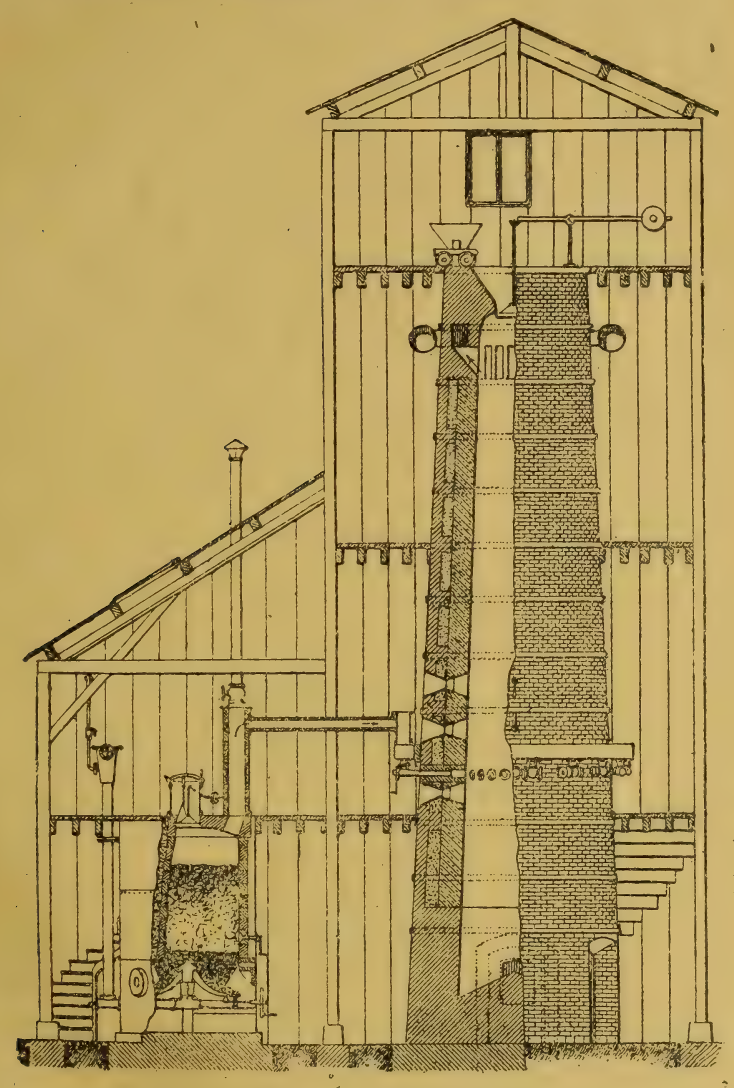


Fig. 5. — Vue du four à chaux chauffé au gaz

A Lafarge la cuisson s'effectue dans 55 fours ordinaires et 10 fours à gaz, auxquels il convient d'ajouter 23 fours plus petits

de l'usine du Teil. Les fours à gaz nous intéressent plus spécialement, car ils fournissent des ciments de qualité remarquable : c'est d'abord la chaux dite maritime pour travaux à la mer, le ciment à haute résistance dit maritime, le ciment extra-blanc et le ciment indécomposable.

Le mode de construction du four à gaz est représenté par la fig. 5. Les constructeurs sont MM. Fichet et Heurtey. Le gaz de chauffage est produit dans des générateurs système Taylor. Les cendres tombent sur un plateau qu'il suffit de tourner à l'aide d'une manivelle pour les évacuer dans le cône inférieur et de là dans un wagonnet placé en-dessous. Fichet et Heurtey ont apporté à ce générateur quelques modifications heureuses. Le générateur fonctionne avec soufflage par un jet de vapeur. Les gaz pénètrent dans le four à chaux par 12 ouvertures pratiquées dans la paroi ; ils ont la composition suivante :

CO	18 — 20 %
CO^2	4 — 5 »
H	12 »
$CH^4 + C^2H^2$	20 »

En sortant du four le gaz contient 30-32 % de CO^2, 3-4 % de CO et 1-2 % d'O. Les fours à chaux sont l'objet d'une surveillance toute spéciale; les gaz de la combustion sont analysés fréquemment. La température maxima à atteindre est de 1800° C. On la contrôle plusieurs fois par 24 heures au moyen du pyromètre optique et on la règle soigneusement dès qu'elle s'écarte de la normale. On obtient ainsi une température de cuisson qui se maintient constante à quelques dixièmes de degré près. La chaux met 3 jours pour traverser le four; elle séjourne pendant 3 heures dans la zône de scorification.

La chaux cuite tirée du four est arrosée de 10-12 % d'eau de la manière habituelle et logée dans les silos, où elle reste 6 jours, parfois plus longtemps. Depuis quelques années on fait l'extinction dans des tambours extincteurs tournant sur eux-mêmes : celui qui fonctionne pour l'extinction de la chaux a une longueur de 15 m. et un diamètre intérieur de 2 m. 10. On y ajoute 6 % d'eau : la température dans l'intérieur du tambour s'élève à 250-270° C. La surface extérieure du tambour est munie d'un revêtement en asbeste, destiné à empêcher autant que possible le refroidissement. On se sert d'un tambour semblable pour

l'extinction du ciment; mais ici l'extinction se fait par la vapeur.

La marche du travail avec emploi du tambour extincteur est la suivante pour la fabrication de la chaux : la chaux tirée du four tombe dans une trémie de chargement à sole tournante, et de celle-ci dans le tambour extincteur. Lorsque l'extinction est terminée le produit est soumis au blutage et fournit alors d'une part de la chaux légère, de l'autre des morceaux non éteints qui sont élevés dans un broyeur, puis soumis à une nouvelle extinction suivie de blutage : le résidu des tamis est broyé dans un tube broyeur; il fournit de la chaux qui est envoyée aux silos, et des grappiers.

***

Nous ne nous arrêterons pas ici aux détails de la fabrication du ciment pour ne pas faire double emploi avec la suite. A l'usine de Lafarge, les clinkers sont broyés à l'aide de broyeurs à boulets et des tubes broyeurs. L'installation est disposée de telle sorte qu'un broyeur à boulets prépare la matière pour 2 tubes broyeurs. La poudre fournie par ces deux appareils tombe dans la cuvette d'un élévateur qui la déverse sur une courroie de transport, de celle-ci elle tombe dans deux tuyaux inclinés qui la conduisent dans les silos. De nouveaux silos viennent d'être construits; ils sont en béton armé et ont une capacité de 24.000 tonnes

Les fabriques de Lafarge et du Teil occupent ensemble de 1.600 à 1.800 ouvriers, dont 300 travaillent à la carrière. La production journalière est de 20.000 sacs de chaux et de ciment. A Lafarge on dispose d'une force motrice de 2.000 chx, au Teil d'une force de 800 chx. L'usine a une station centrale électrique qui fournit le courant aux différents postes.

Terminons cet aperçu par une petite mention au laboratoire de l'usine, qui, sous la savante direction de M. Bied contrôle la fabrication de toutes les usines de la Société. Ce contrôle s'exerce tant sur les matières premières que sur les produits fabriqués. Pour ceux-ci on détermine la résistance, la finesse de mouture, le poids spécifique, le temps de prise et l'invariabilité de volume. Il s'ensuit que toutes les usines travaillent avec une grande uniformité et que tous les produits réalisent les conditions requises par les normes officielles.

Le laboratoire possède trois appareils Michaelis pour la détermination de la résistance à la traction, et une presse Amsler-Laffon pour celle de la résistance à la compression. A y ajouter un appareil Féret pour la détermination de l'adhérence, les dispositifs nécessaires pour l'immersion des éprouvettes et tout le reste de l'outillage nécessaire dans un laboratoire.

Les deux usines de Lafarge et du Teil produisent un grand nombre de chaux et de ciments qui méritent une mention spéciale.

Chaux et ciments de l'usine de Lafarge

a) *Chaux Lafarge.* — Cette chaux a une composition constante : elle contient 64,90 % de CaO et 23,40 % de SiO^2. La prise commence au bout de 7 heures et s'achève en 28 heures. En mortier platisque 1 : 3 elle donne les résistances suivantes à la traction :

Après 7 jours	2,83	kg par cm²
» 1 mois	6,68	» »
» 3 mois	12,92	» »
» 1 an	16,58	» »
» 2 ans	17,83	» »
» 3 ans	17,93	» »

De nombreuses expériences ont montré que la chaux est parfaitement éteinte et qu'elle ne donne jamais de phénomène d'expansion.

b) *Chaux administrative.* — C'est la même chaux que ci-dessus, avec cette différence qu'on apporte à sa fabrication des soins tout particuliers pour qu'elle réponde à toutes les prescriptions du Cahier des charges n° 2 pour les travaux à la mer. En mortier plastique 1 : 3 elle donne une résistance à la traction de 3 kg au bout de 7 jours et une résistance de 6 kg au bout de 28 jours. Elle se trouve, en outre, à une finesse plus grande que celle mentionnée ci-dessus.

c) *Ciment n° 1 Lafarge.* — Comme la chaux Lafarge, ce ciment a une composition constante : il contient en moyenne 62,03 % de CaO et 26,37 % de SiO^2. Sa teneur en silice dépasse la quantité théoriquement nécessaire; la teneur en alumine est de 2,06 %. Ce ciment donne un refus de 5 % sur tamis de 4.900 mailles. Dans l'eau douce il fait prise au bout de 5 heures en

moyenne, et la prise s'achève en 12 heures au plus. En mortier plastique 1 : 3 il a donné les résistances suivantes à la traction :

Après 2 jours	7,49	kg	par cm^2
» 7 jours	11,52	»	»
» 28 jours	17,00	»	»
» 3 mois	24,57	»	»
» 6 mois	26,59	»	»
» 1 an	27,58	»	»
» 1 an ½	30,12	»	»
» 2 ans	29,80	»	»
» 3 ans	29,80	»	»

Ces résistances sont supérieures à celles fournies par les ciments Portland artificiels français expérimentés à titre de comparaison.

d) *Ciment blanc.* — Ce ciment est destiné à la fabrication de carreaux. Il se distingue par sa blancheur, sa finesse et l'absence de fissures dans les carreaux qui en sont fabriqués. Il donne un résidu de 5 % sur tamis de 4.900 mailles. Le commencement et la fin de la prise varient entre 6 et 15 heures. Les résistances sont un peu moindres que celles du ciment Lafarge ci-dessus.

e) *Chaux maritime.* — Il s'agit ici d'une marque indiquant que la chaux convient tout spécialement pour les travaux à la mer, mais on l'emploie également pour la construction de barrages, de ponts, de voûtes, etc. Le résidu sur tamis à 4.900 mailles n'est que de 0,2 %. Le commencement et la fin de la prise sont compris entre 4 et 13 heures ½. La chaux contient 64,85 % de CaO, 22,89 % de SiO^2 et 2,15 % de $Al^2O^3 + Fe^2O^3$. Elle est à prise lente, mais elle donne une résistance assez élevée dès le début.

f) *Ciment des fours à gaz à haute résistance, dit maritime.* — Ce ciment est produit dans les fours à gaz de l'usine de Lafarge; sa fabrication est basée sur la définition du terme « Ciment Portland » telle que la donne le Cahier des charges type n° 1 (ciments en prise à la mer). D'après celle-ci on fabrique le ciment Portland en broyant un mélange intime de carbonate de chaux, de silice, d'alumine et de fer, et faisant cuire ce mélange jusqu'à un commencement de scorification. Le ciment en question correspond par ses propriétés au ciment Portland ainsi fabriqué, et peut être vendu à sa place. Il s'en écarte un peu par son poids spécifique, par suite de sa faible teneur en alumine

et fer. Le ciment maritime des fours à gaz est à prise lente, mais il durcit excessivement vite et convient dès lors tout particulièrement pour les travaux à la mer. Il contient 66,25 % de CaO, 25,60 % de SiO^2 et 2,80 % de $Al^2O^3 + Fe^2O^3$.

g) *Ciment extra-blanc.* — Ce ciment, d'après la définition qu'en donne la Société Lafarge, est d'une blancheur constante, absolue et régulière, et possède une résistance égale à celle des meilleurs ciments d'autre fabrication. Il est à prise lente, mais il acquiert rapidement une grande dureté, de sorte que quand on l'emploie pour la fabrication des pierres artificielles on peut démonter les formes au bout de 24 heures. Il est très avantageux à l'usage, de sorte qu'il peut être employé en mélanges maigres sans rien perdre de sa résistance finale. En ce qui concerne sa composition chimique, il convient de faire observer qu'il est très riche en silice. Le commencement et la fin de la prise varient entre 3-4 et 14 heures. Le mortier de ciment possède une résistance égale à celle des éprouvettes en ciment pur.

h). *Ciment indécomposable.* — Ce ciment possède les résistances d'un bon ciment ordinaire. Il contient 27,65 % de silice insoluble, 27,08 % de silice combinée, 8,42 % de Al^2O^3, 4,58 % de Fe^2O^3 et 27,20 % de chaux. Malgré sa faible teneur en chaux, il a une prise et une résistance initiales largement suffisantes.

La chaux et le ciment fabriqués à l'usine du Teil se rapprochent sensiblement de ceux de l'usine de Lafarge, d'autant qu'ils sont fabriqués d'après les mêmes procédés. Les résistances sont également les mêmes. Le ciment n° 2 a prise lente constitue un mélange purement mécanique de chaux et de ciment; il est destiné à remplacer les mélanges de chaux et de ciment qu'on a l'habitude de confectionner dans les chantiers. On obtient un ciment noir par l'addition de mâchefer des locomotives. Les temps de prise sont les suivants :

	Chaux du Teil	Ciment du Teil	Ciment noir	Ciment 1/2 lent
Commencement.	6 heures $\frac{1}{2}$	4 heures $\frac{1}{2}$	7 heures	2 heures
Fin............	30 »	11 »	11 »	5 »

FABRIQUE DE CIMENT ROMAIN BOYER A LA BEDOULE

La Société Romain Boyer occupe dans le Midi de la France une situation spéciale par l'importance et la qualité de ses produits. Elle est d'ailleurs largement favorisée par l'heureuse situation de

ses différentes usines. Elle possède des gisements de calcaire d'une puissance de 227 m. qui se divisent en 7 étages dont chacun fournit des produits hydrauliques spéciaux : la couche inférieure n° 1 se compose de pierre calcaire blanche, compacte; le n° 2 fournit de la chaux hydraulique siliceuse; le n° 3 se distingue du n° 2 par une teneur un peu plus élevée en oxyde de fer ; les nos 4 et 5 recèlent des marnes siliceuses; les nos 6 et 7 des marnes riches en chaux et alumine. Le tout est recouvert de bancs de silico-calcaire avec failles de terre d'infusoires.

Par le mélange judicieux de ces différentes couches, la Société Romain Boyer est à même d'obtenir n'importe quel dosage pour la fabrication des produits qu'elle livre au commerce.

Les fabriques de la Société sont reliées entre elles et avec les carrières par des voies Decauville. Une station centrale leur fournit l'énergie électrique nécessaire; le courant est fourni par la Société de l'énergie électrique du littoral méditerranéen. On se sert du courant triphasé à 13.000 volts. La Société emploie 1200 chx de force.

Dans une de ses usines, la Société fabrique de la chaux et du ciment riches en silice; dans une seconde usine elle fabrique du ciment naturel; dans deux autres elle fabrique du ciment artificiel : l'une de ces usines sert à la fabrication proprement dite, l'autre au broyage fin.

Dans la fabrique de chaux hydraulique, on obtient en même temps du ciment de grappier. Devant les fours, à une distance de 3 m. 50, se trouvent 10 silos de 35 m. de long et 5 m. de large pour l'extinction de la chaux. Celle-ci, préalablement arrosée d'eau à la sortie des fours, séjourne dans les silos pendant 15 jours, puis elle est soumise au blutage. Le refus des tamis est ensuite broyé. L'atelier de broyage est pourvu de broyeurs à boulets et de tubes broyeurs. La partie pulvérulente est reprise par des élévateurs qui la déversent dans les silos, d'où elle est prélevée ensuite pour l'ensachage et l'expédition. Les grappiers restés comme refus sur les tamis retournent aux silos d'extinction, puis au bout d'un certain temps, ils sont repassés aux broyeurs et aux tamis.

La fabrique de ciment naturel est installé avec un outillage analogue. Les silos y servent à l'emmagasinage du clinker. Comme broyeurs on emploie également des moulins à boulets et des

tubes broyeurs; la poudre sortant de ces broyeurs est immédiatement emmagasinée dans les silos.

Les différentes sortes de ciment produites sont les suivantes :

1. Ciment rapide................	Temps de prise 5 minutes
2. Ciment prompt................	» » 10 »
3. Ciment ½ lent.................	» » 30 »
4. Ciment Portland naturel........	» » 3 et 4 heures.

Pour la fabrication du ciment naturel on travaille d'après le procédé sec. Le broyage et le briquetage des matières s'effectuent dans une fabrique spéciale, mentionnée plus haut. Les marnes calcaires et argileuses, préalablement séchées, sont amenées à pied d'œuvre à la brouette : on amène d'abord à la balance une brouettée de marne calcaire, ensuite on y ajoute de la marne argileuse en quantité déterminée par la pesée. Les quantités de chaque sorte sont déterminées chaque fois au laboratoire au moyen de l'appareil de Scheibler.

Les machines employées pour la préparation des matières premières forment deux groupes comprenant chacun un broyeur à mâchoires, un broyeur à vis chevronnée, 5 moulins à meules horizontales et 2 séparateurs à air.

La poudre fournie par le broyage est emmagasinée dans des silos installés devant la salle de briquetage. Dans celle-ci encore fonctionnent deux groupes de machines comprenant chacun un malaxeur horizotal et une presse Dorsten. Les briques obtenues sont transportées sur des wagonnets sous des hangars de séchage qui sont chauffés par les chaleurs perdues des fours. La cuisson s'effectue dans les fours Schöfer.

Les clinkers sortant des fours sont broyés à l'aide de broyeurs à mâchoires, et ensuite la matière concassée est transportée à l'atelier de mouture fine de l'usine jumelle. Le broyage fin se fait à l'aide de broyeurs à boulets combinés avec des séparateurs à air. Le ciment achevé est élevé dans des silos situés au-dessus de l'atelier de broyage.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, un laboratoire très bien installé et habilement dirigé complète les usines. La fabrication y est soigneusement contrôlée par des analyses journalières, et les produits y sont soumis à toutes les épreuves exigées par les Cahiers des charges.

La Société Romain Boyer a joint à ses fabriques de chaux et

ciments une usine pour la fabrication de carreaux de ciment à la presse hydraulique. Ces carreaux sont gris ou colorés par l'addition de pigments et constituent une branche importante de l'exploitation. Enfin, la Société fabrique elle-même ses barils pour l'expédition du ciment.

La production journalière des fabriques réunies est de 400 tonnes de chaux et ciment, dont 100 tonnes de ciment artificiel.

Four à enfournement et défournement automatiques, système Steiger, construit par les Ateliers d'Arlod. (Fig. 6 et 7).

On trouvera plus loin la description générale des fours verticaux à enfournement et défournement automatiques pour la fabrication du ciment naturel et du ciment Portland. Pour ne pas faire double emploi avec cette description, nous nous contenterons d'indiquer ici les particularités du four à chaux hydraulique du même système.

L'enfournement peut être rendu complètement automatique par l'emploi d'appareils spéciaux d'alimentation et de distribution. On se sert à cet effet d'un monte-charge vertical ou incliné à marche automatique, qui élève le calcaire aussi bien que le combustible. On peut adopter également la marche demi-automatique : dans ce cas le calcaire est chargé directement dans le four par une trémie, tandis que le charbon est simplement déversé sur la plateforme supérieure.

Le défournement est rendu complètement automatique au moyen des appareils spéciaux construits par les Ateliers d'Arlod. Ces appareils permettent d'imprimer à la cuisson une très grande régularité, la chaux cuite étant défournée d'une manière continue au lieu de l'être par intervalles.

Au lieu de faire tomber la chaux dans une trémie qui la déverse dans un wagonnet, on peut aussi la faire tomber sur un transporteur à secousses ou autre par un tuyau hermétiquement fermé, et éviter ainsi tout dégagement de poussière.

Grâce au défournement automatique et à son système perfectionné de ventilation des fours, la Société des Ateliers d'Arlod est arrivée à réduire la dépense de combustible à un minimum qui n'avait jamais été atteint ; en même temps elle imprime à la cuisson une grande uniformité qui évite la production d'incuits.

Dans nombre de fours de son système pour chaux hydraulique lourde, la dépense de combustible ne dépasse pas 30.000 calories par 100 kg. de chaux cuite. Il est clair toutefois que, eu égard à la nature des calcaires et aux grandes différences de qualité qu'ils accusent, la consommation de combustible ne peut être évaluée exactement qu'après examen de la matière à traiter.

Le four Steiger donne des rendements élevés. L'emploi des améliorations sus-mentionnées permet d'augmenter la production d'environ 50 %.

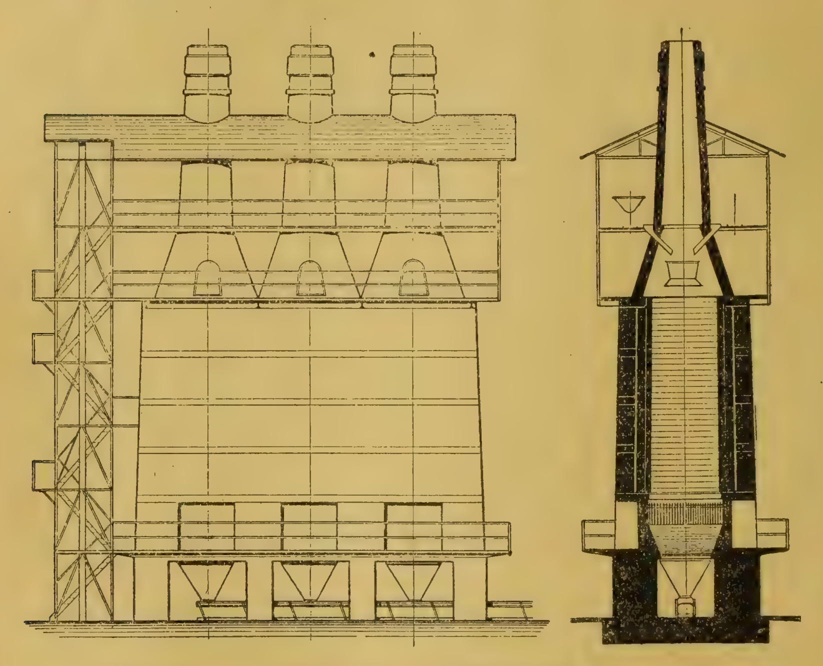


Fig. 6 et 7. — Vue du four à chaux syst. Steiger en coupe long. et transversale

Dans la situation actuelle, et en présence du coût élevé de la main-d'œuvre et du combustible, les fours à fonctionnement automatique constituent un vrai progrès sur les anciens systèmes, et les fabricants de chaux hydraulique ont tout intérêt à entrer résolument dans la voie qui leur est tracée. La Société des Ateliers d'Arlod construit d'ailleurs également des fours plus simples pour les cas, assez rares du reste, où la marche automatique ne serait pas applicable.

CIMENT ROMAIN

Parmi les chaux hydrauliques, c'est le ciment romain qui a la teneur la plus élevée en silicates, contre 50 à 70 % de carbonate de chaux. Mais, il contient également une certaine proportion de chaux caustique libre, et c'est là une des caractéristiques qui le distinguent du ciment Portland.

Sa composition est assez variable, ainsi que le montrent les analyses suivantes (de Hauenschild) des trois ciments les plus connus :

	Perlmos	Egger et Lutti	Alex Curtis
Silice	23,67	26,80	25,»»
Alumine	8,83	10,30	9,»»
Oxyde de fer	5,92	1,90	4,39
Chaux	58,80	59,80	58,02
Magnésie	0,73	0,30	1,08
Alcalis	1,22	0,70	0,62

Cette composition se rapproche beaucoup de celle du ciment Portland ; mais, le rapport de la chaux à la silice peut tomber jusqu'à 1,2 : 1.

La cuisson du ciment romain s'effectue également à une température inférieure à celle employée pour le ciment Portland, et ne doit pas être poussée jusqu'au ramollissement de la matière. Les roches obtenues doivent être réduites en poudre fine par le broyage. Cette poudre est de nature terreuse, sa couleur varie du gris-jaunâtre au brun-rougeâtre, son poids spécifique est de 2,7.

Le ciment romain ne doit s'échauffer que modérément quand on le gâche avec de l'eau; il est généralement à prise rapide à l'eau comme à l'air et s'emploie, par suite, surtout pour aveugler les voies d'eau lorsque la question de résistance ne vient qu'au second plan. A l'état pur il a une résistance moyenne ; transformé en mortier avec trois parties de sable, il présente les résistances suivantes :

Après	7 jours	28 jours	365 jours
Résistance à la fraction	10 kg	15 kg	25 kg
Résistance à la compression	75 kg	120 kg	225 kg

Ces résistances, comme on le voit, sont beaucoup plus considérables que celles de la chaux hydraulique proprement dite ;

mais elles sont plus faibles que celles du ciment Portland eu égard à la différence de poids spécifique.

Dans l'essai de l'invariabilité de volume, le ciment romain ne doit accuser aucune déformation, ni crevasses sur les bords ou à la surface après un séjour de 6 heures dans l'étuve à vapeur ou dans l'eau chauffée à 70-75° C.

Le ciment romain doit être conservé avec beaucoup de soin, car il absorbe l'humidité et l'acide carbonique avec une avidité extraordinaire et subit alors des décompositions. Pour ce motif aussi il est impropre à l'exportation dans les pays d'outremer. Le ciment Portland lui est de beaucoup supérieur sous ce rapport.

CIMENT DOLOMITIQUE

Le ciment dolomitique obtenu par la cuisson de pierre calcaire riche en magnésie ne constitue qu'une variété de ciment romain; il est souvent mis dans le commerce sous la même dénomination. Les roches dolomitiques contiennent 45,7 % de carbonate de magnésie sur 54,3 % de carbonate de chaux; elles renferment en outre différents autres éléments. Le Dr Schoch donne l'analyse moyenne suivante de pierres dolomitiques russes :

Silicates	6,6 %
Carbonate de chaux	53,6 »
Carbonate de magnésie	37,8 »

Les ciments dolomitiques se distinguent par la propriété, due à la magnésie, de se durcir sous l'eau en présence de carbonate de chaux. On doit donc se borner, dans leur cuisson, à expulser l'acide carbonique de la magnésie; en aucun cas on ne doit dépasser la température de 400° C. Si l'on donne un chauffage plus intense, il se forme de la chaux caustique qui ne développera sous l'eau aucune propriété hydraulique. Lorsque la matière première mise en œuvre est riche en alumine, on peut dépasser la température de 400° C. à la cuisson, la chaux caustique se combinant alors avec les silicates pour former des composés hydrauliques qui ne se dilatent pas sensiblement dans l'eau (Dr Michaelis). Pour ne pas être obligé au maintien strict de la température exacte, on peut ajouter à la matière cuite une petite quantité de silicates solubles, sous forme de poudre de briques par exemple.

Le ciment dolomitique ne doit pas non plus s'échauffer sensi-

blement quand on le gâche avec de l'eau. Sa résistance propre, c'est-à-dire celle de son mortier, est située entre celle de la chaux hydraulique proprement dite et celle du ciment romain. Le ciment fabriqué en Russie avec la matière première analysée plus haut, gâché avec du sable (1 : 5) a fait prise en 3-4 heures ; au bout de 7 jours d'exposition à l'air et 21 jours de séjour dans l'eau, sa résistance à la traction s'est élevée à environ 9 kg. Le ciment magnésien ne peut être éteint avec l'eau; il est donc nécessaire de le broyer finement comme le ciment romain.

LES CHAUX HYDRAULIQUES ARTIFICIELLES

Les chaux hydrauliques artificielles proprement dites comprennent le ciment de pouzzolane, les ciments de trass et de Santorin qui s'en rapprochent, et le ciment de laitier qui est d'invention récente.

Les chaux hydrauliques artificielles sont toujours des mélanges de pouzzolane ou de laitier basique granulé et d'hydrate de chaux.

Les anciens ajoutaient à la chaux des roches volcaniques, qui sont surtout répandues en Italie et connues sous le nom de pouzzolanes. On a trouvé, en outre, deux autres matières additionnelles d'excellente qualité, savoir la terre de Santorin et le trass. Ce n'est que dans les temps modernes qu'on a songé à remplacer les pouzzolanes, quand elles revenaient à un prix trop élevé, par des produits artificiels tels que : argile calcinée, poudre de briques, cendres de houille, verre pilé, déchets de la fabrication de l'alun, et enfin des scories de haut-fourneau. La fabrication du ciment de laitier a pris notamment une grande extension depuis quelques années.

Les chaux hydrauliques artificielles peuvent donc être classées comme suit :

a) Chaux avec addition de matières naturelles :

Ciment de pouzzolane;

Ciment de Santorin;

Ciment de trass;

b) Chaux avec additions de matières artificielles :

Ciment de laitier, etc.

Pour préparer ces ciments, on transforme d'abord la chaux en hydrate pulvérulent, en faisant en sorte de l'éteindre d'une

manière complète afin de ne pas laisser de fragments dans la masse. Ces fragments, provenant de chaux surcuite ou insuffisamment hydratée, s'éteindraient après coup et fourniraient un mortier expansif. Il est essentiel que les deux composants soient à l'état de poudre très fine si l'on veut que leur réaction dans le mortier se développe régulièrement et sûrement. Ce résultat est facile à obtenir en ce qui concerne la chaux, tandis qus les matières additionnelles doivent être finement broyées. Lorsque les deux matières se trouvent à l'état de poudre fine, on les mélange à fond et on les expédie en sacs. Toutes ces opérations s'effectuent à l'aide des mêmes appareils que ceux employés pour le ciment Portland.

Les ciments pouzzolaniques convenablement fabriqués perdent la granulation sableuse-terreuse de leurs composants; ils prennent une consistance farineuse, molle, et leur couleur naturelle répond à celle de la matière hydraulisante ajoutée. Ces ciments ne s'échauffent pas au gâchage et sont à prise lente. Ils ne doivent pas changer de volume sous l'eau; quand ils se durcissent à l'air, ils ont souvent une tendance à se fendiller.

Les proportions de chaux et de matière hydraulisante ajoutée dépendent de la composition de cette dernière. Nous ne pouvons donc donner de « mélanges normaux » en proportions déterminées, et nous nous contenterons d'indiquer les résistances de quelques mélanges d'après Tetmajer :

Mortier de ciment de pouzzolane : 1 : 3 de sable.

Résistance après 7 jours d'exposition à l'air, 21 jours dans l'eau :

Pouzzolane	Chaux	Résistance à la traction	Résistance à la compression
60	40	4,8	25
80	20	4,5	34
60	40	11,0	60
80	20	14,0	90
60	40	14,5	77
80	20	15,5	78

Différents essais faits avec du mortier de ciment de trass (con-

tenant 1 de chaux et 2 de trass) préparé avec 3 de sable ont donné au bout de 28 jours, dans les mêmes conditions que les mortiers de ciment de pouzzolane ci-dessus, les résistance suivantes, d'après le Dr Schoch :

Résistance à la traction	10-16 kg
Résistance à la compression	50-90 kg

Les mortiers normaux (1 : 3) préparés avec du ciment de Santorin et de la chaux fournissent des résultats analogues.

Les ciments de laitier, qui sont actuellement les seuls ciments pouzzolaniques fabriqués industriellement, peuvent être employés pour tous les travaux exécutés lentement sous l'eau ou en atmosphère humide et n'exigeant pas une grande résistance initiale. Les bons ciments de laitier, tout comme les ciments de trass, conviennent spécialement pour le bétonnage dans l'eau. Ils sont un peu moins propres aux constructions à l'air libre. Nous les étudierons plus en détail dans le corps de cet ouvrage.

CIMENTS MÉLANGÉS

Les ciments mélangés sont des produits obtenus par le mélange mécanique de ciments achevés avec d'autres matières.

Pour augmenter la souplesse, l'adhésivité, l'imperméabilité à l'eau, la réceptivité de sable en vue d'applications spéciales, on peut ajouter à n'importe quel ciment des matières étrangères, convenablement choisies.

Mais les ciments de cette nature doivent être vendus sous des dénominations spéciales.

Les chaux hydrauliques artificielles constituent essentiellement des liants hydrauliques et conviennent peu ou point pour les constructions à l'air libre. Le ciment de Santorin est même un liant exclusivement hydraulique et ne donne que des résultats négatifs à l'air libre.

CHAPITRE II

LE CIMENT PORTLAND

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

Le ciment Portland a été découvert par Joseph Aspidin à Leeds (Angleterre). Dans les tentatives qu'il fit pour remplacer par des produits artificiels les mortiers hydrauliques naturels, les ciments romain et de pouzzolane, il réussit, en mélangeant les matières premières dans des proportions déterminées et faisant cuire le mélange à une température assez élevée, à obtenir un produit réunissant toutes les conditions d'un mortier hydraulique d'excellente qualité. Il donna à ce produit le nom de ciment Portland à cause de la ressemblance qu'il avait, après durcissement dans l'eau, avec une pierre de très bonne qualité qu'on trouvait dans les environs de Portland.

La découverte d'Aspidin ne tarda pas à se répandre dans les autres pays. La première fabrique de ciment Portland créée sur le continent fut celle de Boulogne-sur-Mer. D'autres usines furent créées successivement en France et en Allemagne.

La fabrication industrielle du ciment Portland est, on le voit, d'origine relativement récente, et il est dès lors facile de comprendre que les procédés et les machines employés soient loin d'avoir atteint tous les perfectionnements dont ils sont susceptibles. Ce n'est d'ailleurs que depuis quelques années que la science industrielle a orienté ses recherches vers cette industrie; elle est arrivée peu à peu à en démêler les côtés obscurs et à résoudre d'une manière simple et économique les difficultés rencontrées dans la fabrication.

On obtient le ciment Portland en soumettant à la cuisson jusqu'à scorification de la marne calcaire ou des mélanges de matiè-

res argileuses et calcaires, convenablement dosées, et réduisant ensuite le produit en poudre fine par le broyage. Pour régler ses propriétés techniques, on peut y ajouter jusqu'à 2 % de matières étrangères sans être tenu à vendre le produit sous un autre nom.

Les ciments obtenus directement par la cuisson de marnes calcaires appropriées sont appelés *ciments Portland naturels.* Ils se distinguent des *ciments Portland artificiels* en ce sens que les éléments qui entrent dans la composition de ces derniers sont mélangés artificiellement à un état finement divisé.

Exposées aux agents atmosphériques ou humectées d'eau, les roches de ciment (clinkers) de composition normale ne se réduisent pas en poudre; il est donc nécessaire de les broyer finement à l'aide d'appareils appropriés. La matière broyée forme des granules a arêtes, de couleur grise, avec nuance verte ou jaunâtre. Gâché avec de l'eau, le ciment Portland ne s'échauffe que faiblement; il est à prise rapide ou lente suivant les cas; sa solidité est très grande et augmente avec le temps, qu'il soit employé à l'état pur ou additionné de sable; il ne doit changer de volume ni à l'air, ni sous l'eau.

Bien scorifié, le ciment Portland a généralement un poids spécifique de 3,10 ; sa perte à la calcination est le plus souvent inférieure à 2 %. Le ciment Portland faiblement calciné, ou provenant de clinkers qui ont été conservés ou hydratés longtemps avant d'être broyés, perd jusqu'à 4 % à la calcination et possède un poids spécifique inférieur à 3,10.

Le ciment Portland peut être employé pour toutes les constructions à l'air ou dans l'eau, et plus spécialement pour celles qui exigent une grande solidité initiale, une grande résistance au froid et aux influences atmosphériques dans la première phase du durcissement, ou une grande résistance à l'usure mécanique. Dans les constructions sous l'eau, il faut faire en sorte que le ciment ait achevé sa prise autant que possible avant qu'il ne soit exposé à l'action de l'eau. Inversement, dans les constructions à l'air, il est indispensable de les maintenir uniformément humides dans la première période de durcissement du ciment, si l'on veut que celui-ci développe toute sa résistance.

COMPOSITION DU CIMENT

D'après Le Chatelier, le ciment Portland se compose d'un mélange de silicate tricalcique $SiO^2—3CaO$ et d'aluminate tricalcique $Al^2O^3—3CaO$. Ce savant est arrivé à cette conclusion après une longue série d'expériences consistant à examiner des sections minces de clinker au microscope polarisant. D'un autre côté, il a reproduit synthétiquement les silicates et les aluminates de calcium en chauffant des mélanges intimes de chaux, de silice et l'alumine, et examinant les propriétés hydrauliques des produits ainsi obtenus. Cependant, il n'a pas réussi à préparer le silicate tricalcique directement par chauffage de chaux et de silice, ses essais n'ayant abouti qu'à un mélange de silicate et de chaux; il estime que ce produit peut être obtenu indirectement en chauffant ensemble un mélange de silicates fusibles et de chaux.

Le silicate tricalcique est l'élément essentiel du ciment Portland, dans lequel on le trouve sous forme de cristaux cubiques. Dans ce composé, la chaux et la silice se trouvent dans un rapport de 2,78 : 1.

Le Châtelier a examiné également sous le microscope des sections minces de ciment durci, et il a remarqué qu'elles consistaient en lamelles hexagonales d'hydroxyde de calcium cristallisé [Ca, $(OH)^2$], englobé dans une couche blanche de cristaux en aiguilles de silicate monocalcique hydraté $(CaSiO^3)^2 5H^2O$. De ces recherches il conclut que le silicate tricalcique mélangé avec de l'eau réagit pour former un silicate monocalcique hydraté et un hydroxyde de calcium, d'après l'équation suivante :

$$2CaSiO^3 + 9H^2O = (CaSiO^3)^2 — 5H^2O + 4Ca(OH)^2.$$

Il est probable que l'hydroxyde de calcium continue alors à réagir sur l'aluminate de calcium du ciment pour former un aluminate de calcium basique hydraté, $Ca^4Al^2O^7 12H^2O$.

$$Ca^3Al^2O^6 + Ca(OH)^2 + 11H^2O = Ca^4Al^2O^7 — 12H^2O.$$

Le durcissement du ciment serait dû à la première réaction, mais la formation de l'aluminate de calcium basique hydraté exerce probablement une influence marquée sur le temps de prise du ciment.

INDICE HYDRAULIQUE

En partant de ce principe que trois molécules de chaux s'unissent avec une molécule de silice pour former un silicate tricalcique, que trois molécules de chaux se combinent avec une molécule d'alumine pour former un aluminate de calcium, et que ces deux composés sont les éléments essentiels du ciment, Le Chatelier donne le rapport suivant entre la chaux et la magnésie, éléments basiques, et la silice et l'alumine, éléments acides d'un bon ciment :

1° Formule de Le Châtelier (1) et (2) :

$$\frac{CaO,\ MgO}{SiO^2 + Al^2O^3} < 3, \text{ et } \frac{CaO,\ MgO}{SiO^2 - (Al^2O^3.F^2O^3)} > 3.$$

Le Chatelier conclut qu'un bon ciment donne habituellement de 1,5 à 2, pour (1) et de 3,5 à 4 pour (2).

Ce rapport entre la silice et l'alumine d'une part et la chaux de l'autre est appelé « indice hydraulique ».

Erdmenger a fait remarquer cependant que les deux équations ci-dessus ne sont pas basées sur l'expérience, et que l'hypothèse que la chaux et la magnésie ont une égale valeur hydraulique est erronée. En outre, on reproche aux deux formules de M. le Chatelier (indice maximum et indice minimum) de présenter un écart trop considérable.

2° Formule de Vicat :

$$I = \frac{CaO + MgO}{100 \times (SiO^2 + Al^2O^3)}.$$

L'indice varie entre 42 et 48. Les normes françaises lui imposent une valeur minima exprimée par la formule suivante :

$$44 < \frac{SiO^3 + Al^2O^3}{CaO}.$$

3° Formule de Michaelis (module hydraulique) :

$$1,8 < \frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3} < 2,2.$$

4° Normes allemande, autrichienne et suisse :

$$1,7 < \frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3}.$$

Cette formule est celle de Michaelis, mais sans limite supérieure et à limite inférieure abaissée.

5° Norme russe :

$$1,7 < \frac{CaO + Na^2O + K^2O}{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3} < 2,2.$$

6° Norme anglaise :

$$\frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3} < 2,85.$$

7° Formule de Newberry :

$$CaO = 2,8\ SiO^2 + 1,1\ Al^2O^3$$

ou, en posant 1 au lieu de 1,1, comme Newberrry l'admet pour la pratique, on a :

$$\frac{CaO - Al^2O^3}{SiO^2} = 2,8.$$

2,8 est la limite supérieure, 2,6 la limite inférieure, 2,7 la valeur moyenne pratique. La valeur exprimée par la formule est appelée « facteur chaux » par Newberry. Cette formule est déduite de celle de Le Châtelier.

Théorie de Newberry. — Dans une série de recherches sur la constitution du ciment, Spencer et W. B. Newberry sont arrivés à des conclusions toutes différentes de celles de M. Le Châtelier. Ils ont préparé synthétiquement des silicates et des aluminates de chaux en chauffant ensemble des mélanges finement pulvérisés de quartz, de carbonates de calcium et d'aluminium en différentes proportions moléculaires. Ils ont ensuite étudié la prise et le durcissement des produits obtenus. Ils sont d'accord avec M. Le Châtelier sur ce point que la silice se trouve dans le ciment sous forme de silicate tricalcique, et que c'est à ce dernier qu'est dû le durcissement du ciment : ils ont obtenu le silicate tricalcique directement en chauffant ensemble de la silice et de la chaux dans la proportion moléculaire de 1 : 3. De leurs expériences sur les aluminates de calcium, MM. Newberry concluent que l'alumine se trouve combinée à la chaux sous forme d'aluminate bicalcique, et non tricalcique. De ces expériences ils tirent les conclusions suivantes :

1° La chaux peut être combinée avec la silice dans la proportion de 3 : 1 molécules, et donner néanmoins un produit non expansif se durcissant bien, quoique lentement. Avec 3 molécules $\frac{1}{2}$ de chaux pour 1 de silice, le produit est de mauvaise qualité et se fendille dans l'eau.

2° La chaux peut être combinée avec l'alumine dans la propor-

tion de 2 molécules contre 1, et donner un produit à prise rapide, de volume constant et se durcissant bien. Avec 2 $\frac{1}{2}$ molécules de chaux sur 1 d'alumine, on obtient un produit de mauvaise qualité.

Recherches de Richardson. — Clifford Richardson, dans un rapport présenté à l'association des fabricants de ciment américains en 1904, décrit les résultats que lui a fournis l'éude microscopique du clinker de ciment Portland. En matière de conclusion, il se rallie à la théorie formulée tout d'abord par Winkler en 1858, d'après laquelle le ciment serait une solution solide. Richardson a préparé un grand nombre de silicates et d'aluminates par synthèse, et déterminé leurs propriétés optiques, leur hydraulicité et leurs caractères physiques, qu'il décrit comme suit :

Silicate monocalcique SiO^2CaO. Substance cristalline d'un grand pouvoir optique et dont les propriétés hydrauliques sont faibles ou nulles. Poids spécifique : 2,9. Ce produit existe dans la nature; on l'a appelé wollastonite.

Silicate bicalcique SiO^22CaO, ou plus probablement $2SiO^24CaO$. Composé cristallin défini, d'un grand pouvoir optique et d'une faible hydraulicité, si ce n'est en présence d'acide carbonique, à prise lente dans l'eau, augmentant généralement de volume. Poids spécifique : 3,29. Ce composé n'existe pas dans la nature, il n'a été obtenu qu'au laboratoire.

Silicate tricalcique SiO^23CaO, ou probablement $2SiO^26CaO$. Silicate cristallin bien défini, de faible pouvoir optique et correspondant à l'alite sous ce rapport (voir ci-dessous). Son hydraulicité est faible, plus grande cependant que celle du silicate bicalcique. Amené à l'état de fusion et solidifié ensuite, il est à prise lente comme le ciment Portland. Son poids spécifique est de 3,03.

Il existe donc trois silicates de calcium bien définis, dont les deux plus basiques diffèrent considérablement l'un de l'autre par leur pouvoir optique.

Aluminate monocalcique Al^2O^3CaO. Substance cristalline d'un pouvoir optique élevé, mais pas suffisamment basique pour se rencontrer dans une matière aussi fortement basique comme le clinker de ciment Portland. Poids spécifique : 2,90.

Di-aluminate tricalcique 2 Al^2O^23CaO. Substance nettement

cristalline, d'un pouvoir optique très élevé, qui permet de la reconnaître facilement. Poids spécifique : 2,92.

Aluminate dicalcique Al^2O^32CaO. Substance cristallisant à l'état de fusion en forme dentritique, dénuée de tout pouvoir optique, par conséquent isotropique. Cette particularité différencie très nettement cet aluminate du précédent, et permet de les distinguer aisément l'un de l'autre. Poids spécifique : 2,79.

Aluminate tricalcique Al^2O^33CaO. Cet aluminate cristallise à l'état de fusion en octaëdres allongés. Il est isotropique, et au premier abord on serait tenté de le considérer comme un composé non défini, mais simplement comme un silicate dicalcique cristallisant d'un magma de composition indéterminée. Des recherches plus appronfondies ont montré cependant que c'est un aluminate bien défini. Poids spécifique : 2,91.

Théorie de la solution solide.

Richardson, partant de l'hypothèse émise par Winkler d'après laquelle le clinker serait une solution solide, a préparé des clinkers avec de la silice, de l'alumine et de la chaux pures dans les mêmes proportions que celles que l'on rencontre dans le ciment fabriqué par l'industrie. Les proportions moléculaires furent calculées d'après les résultats de deux analyses de clinker industriel; on prépara ensuite des clinkers dont la composition répondait aux formules suivantes :

12 (SiO^23CaO) + 2 (Al^2O^3CaO) = 38 CaO,
» » + 1 ($2Al^2O^33CaO$) = 39 CaO,
» » + 2 (Al^2O^32CaO) = 40 CaO,
» » + 2 (Al^2O^33CaO) = 42 CaO.

Des sections minces de ces clinkers montrèrent que l'une des substances présente, correspondant à l'aluminate monocalcique, contenait une importante proportion de célite; que la substance correspondant à une basicité plus grande (2 Al^2O^33CaO) en contenait moins; que celle correspondant à Al^2O^3CaO en contenait encore moins, tandis que celle dans laquelle on suppose que l'aluminate se trouve sous la forme tricalcique Al^2O^33CaO ne contenait pas de célite, mais était de l'alite pure, correspondant sous tous les rapports à l'alite observée dans le clinker de Portland industriel.

La composition de l'alite s'explique ainsi d'une manière très satisfaisante. C'est une solution solide de silicate tricalcique dans

l'aluminate tricalcique. Et si l'on réfléchit, on se rend compte que l'aluminate dicalcique ne pourrait se dissoudre dans le silicate tricalcique sans réaction et sans échange de base entre le silicate tricalcique et l'aluminate dicalcique, au point de transformer une partie de l'aluminate dicalcique en aluminate tricalcique et de ramener une portion correspondante du silicate tricalcique à la forme dicalcique. L'aluminate tricalcique se dissout donc dans le silicate tricalcique et l'aluminate dicalcique dans le silicate dicalcique, formant ainsi deux solutions solides distinctes dont l'une est l'alite, l'autre la célite, lesquelles étant sans doute miscibles à l'état de fusion, ne le sont plus à l'état solide. De même, dans les clinkers de forme moins basique dans lesquels la quantité de chaux serait juste suffisante pour former du di-aluminate monocalcique ou tricalcique, l'échange de bases se ferait d'une manière analogue, mais avec une proportion beaucoup plus grande de célite à mesure que la basicité diminue.

Richardson conclut également de ses recherches que la prise du ciment Portland est due presque entièrement à la décomposition de l'alite, l'examen montrant que la célite est presque inattaquée ; et que la résistance du ciment Portland après la prise est due entièrement à la cristallisation de l'hydrate de calcium dans des conditions très favorables, et nullement à l'hydratation des silicates et des aluminates.

Il estime que l'addition d'eau au système stable formé par les solutions solides qui forment le ciment Portland a pour effet d'introduire un nouveau composant qui amène immédiatement une rupture d'équilibre, lequel ne se rétablit que par la mise en liberté de chaux. Cette chaux, du moment qu'elle est mise en liberté, est en dissolution dans l'eau ; mais, étant donnée la rapidité avec laquelle la chaux se sépare de l'aluminate, l'eau se sursature bientôt d'hydrate calcique, ce dernier cristallise et forme un réseau de cristaux qui relie ensemble les particules de ciment indécomposé. La prise initiale serait due aux aluminates, et le durcissement ultérieur à la mise en liberté lente de la chaux des silicates.

Recherches de Törnebohm

Tôrnebohm, savant suédois, a identifié dans le ciment quatre constituants minéraux qu'il appela *alite*, *belite*, *felite et célite.*

L'alite est l'élément prépondérant et consiste en cristaux incolores d'un pouvoir réfringent assez prononcé, mais à double réfraction assez faible. L'auteur entend par là que l'alite, examinée entre des prismes de Nicol croisés, a une activité optique insuffisante pour produire plus qu'une faible interférence gris-bleuâtre.

La *célite* est caractérisée par sa couleur brune-orange. Elle remplit les interstices laissés par les autres constituants et forme éventuellement le magma ou liquide à point de congélation le plus bas; elle est à double réfraction, c'est-à-dire qu'elle donne des couleurs vives quand on l'examine entre deux prismes de Nicol croisés.

La *bélite* se distingue par sa couleur vert sale et par ses brillantes couleurs d'interférence. Elle est à deux axes et possède un indice de réfraction élevé; elle forme des petits grains arrondis, non cristallins.

La *félite* est incolore. Son indice de réfraction est presque le même que celui de la bélite; elle donne une forte réfraction double. Elle se présente sous forme de grains arrondis, souvent allongés, mais sans forme cristalline. Elle peut faire complètement défaut dans le ciment.

En dehors de ces éléments, on a encore trouvé dans le ciment une masse amorphe isotropique, c'est-à-dire n'agissant pas sur la lumière polarisée. Elle possède un indice de réfraction très élevé. Törnebohm ajoute ce détail important qu'un ciment contenant 4 % de chaux de plus que le ciment normal se compose presque uniquement d'alite et de célite.

SUBSTANCES CONTENUES DANS LE CIMENT

Comme on le voit par ce qui précède, les éléments essentiels du ciment Portland sont : la chaux, la silice et l'alumine. Une petite partie de l'alumine est toujours remplacée par l'oxyde ferrique et une partie de la chaux par de la magnésie. On trouve également dans le ciment de faibles quantités d'alcalis, potasse et soude, contenus dans l'argile sous forme de silicates; enfin malgré une cuisson très soignée, la pierre à chaux retient toujours des traces d'acide carbonique. A ces traces vient se joindre un peu d'acide carbonique et d'eau absorbés par le produit dans l'air atmosphérique. Enfin, on trouve encore dans le ciment des traces

de manganèse, de titane, de phosphore, de strontium, d'oxyde ferreux et de sulfures. Nous allons étudier rapidement ces divers éléments avec R. Meade (1) :

Chaux. — Un ciment de bonne qualité contient de 58 à 67 % de chaux, dont la proportion dépend des proportions relatives de silice et d'alumine, et aussi du soin qu'on a apporté à la fabrication. On peut dire que plus un ciment contient de chaux dans les limites ci-dessus, plus il sera résistant. Il y a excès de chaux lorsque la matière en contient plus que la quantité requise pour se combiner à la silice et à l'alumine. Or, un excès de chaux non combinée à la silice et à l'alumine augmentera de volume en s'hydratant, et fera fendiller le ciment.

Les ciments à teneur élevée en chaux sont généralement à prise lente, mais ils se durcissent rapidement, atteignant parfois leur maximum de résistance en 28 jours. Après ce délai, il paraît se produire une rétrogradation dans la résistance des éprouvettes soumises à la traction, et l'on a beaucoup discuté pour savoir si cette diminution de résistance ne serait pas due plutôt à l'étranglement que subit l'éprouvette dans l'essai qu'à l'effort de traction appliqué. Cette explication paraît être la vraie, les éprouvettes soumises à la compression accusant rarement ce genre de rétrogradation. Du moment qu'un ciment est normal, il n'y a aucun motif théorique qui permette d'affirmer que les ciments à prise lente et à durcissement progressif soient meilleurs que ceux à prise rapide : en réalité un ciment qui atteint rapidement son maximum de résistance paraît préférable à un ciment qui met des années pour arriver au même point.

Les ciments à faible teneur en chaux contiennent de l'argile en excès, parce que les matières premières ne contenaient pas assez de chaux pour transformer toute l'argile en silicates et aluminates. L'argile en excès, doit être considérée simplement comme une impureté du ciment; elle ne diminue ses qualités de résistance que par la place qu'elle y occupe.

Les ciments à faible teneur en chaux sont à prise rapide. Par conséquent, pour avoir des ciments à prise lente, il suffit d'augmenter la proportion de calcaire dans les matières brutes. C'est

(1) Portland Cement. — Edité par *The Chemical publishing C°*, Easton, P A (Etats-Unis).

pourquoi les ciments riches en alumine contiennent souvent plus de chaux que ceux qui sont pauvres en alumine, quoique cette dernière se combine avec moins de chaux que la silice.

La quantité de chaux qu'un ciment pourra supporter dépend des soins apportés au mélange des matières premières. Si l'on se rapproche tant soit peu de la chaux limite (indiquée par l'analyse de la pierre à chaux, de la marne, de l'argile), on s'expose à obtenir un ciment à teneur trop élevée en chaux si l'on ne soigne pas très bien le broyage et le mélange des matières, car les particules de carbonate de chaux ne viendraient pas alors en contact assez intime avec la silice et l'alumine pour se combiner avec elles. Un ciment bien cuit aura également une teneur plus élevée en chaux qu'un ciment mal cuit. Un ciment cuit à une température inférieure à celle nécessaire pour la combinaison de la chaux avec la silice et l'alumine contiendrait de la chaux libre.

Il s'ensuit que l'analyse chimique seule ne peut guider le fabricant pour l'éclairer sur la composition finale du ciment, vu que, de deux ciments à égale teneur en chaux, l'un peut être de qualité normale s'il est bien fabriqué, tandis que l'autre peut être de mauvaise qualité si les opérations de broyage, de mélange et de cuisson ont été mal exécutées.

La plupart des ciments cuits au four rotatif contiennent 61 à 64 % de chaux immédiatement après leur broyage. Au bout d'un certain temps de conservation, la teneur en chaux diminue un peu par suite de l'absorption d'eau et d'acide carbonique. Quelle que soit l'application du ciment, sa teneur en chaux se révèle de deux manières : par le temps de prise et par l'invariabilité de volume. Il doit contenir assez de chaux pour ne pas faire prise trop rapidement, il ne doit pas en contenir assez pour donner de l'expansion à l'essai. Lorsque les matières premières sont riches en alumine, on n'a qu'une marge très faible entre les limites extrêmes. Il faut alors apporter à la fabrication les plus grands soins, broyer les matières très finement et uniformément et les faire cuire à une température convenable. Avec une teneur faible en alumine, on a une marge beaucoup plus grande; on se rappellera alors qu'on obtient un ciment d'autant plus résistant que sa teneur en chaux se rapproche davantage du maximum.

Silice. — La silice est, après la chaux, l'élément le plus impor-

tant du ciment Portland et celui qui s'y trouve ensuite en proportion plus grande, ordinairement de 19 à 25 %. Les ciments qui en contiennent 25 % sont généralement pauvres en alumine, ceux qui en contiennent 19 % sont riches en alumine. Les ciments riches en silice sont à prise lente et possèdent une grande résistance à la traction. Avec leur teneur en silice augmentent en même temps la résistance, la durée du temps de prise, et aussi la température de cuisson. Le ciment doit contenir au moins 2,5 fois plus de silice que d'alumine si l'on veut éviter une prise rapide.

Comme les silicates dont on dispose pour la fabrication du ciment contiennent généralement trop d'alumine pour réaliser cette proportion, on a recours pour augmenter la teneur en silice dans le mélange, à l'argile contenant de la silice libre, à un état finement divisé, facile à combiner avec la chaux; on évitera l'emploi des argiles contenant la silice sous forme de quartz, de cailloux.

Le rapport de la silice aux sesquioxydes est appelé *module des silicates;* lorsque ce rapport a une valeur moyenne le ciment Portland peut contenir une plus grande quantité de chaux que lorsqu'il s'agit de compositions très riches en silice ou très pauvres en silice. Dans les limites de composition des véritables ciments Portland, dans lesquelles par conséquent la valeur du module des silicates est comprise entre 1 : 1,2 et 1 : 4,0, la silice peut fixer jusqu'à 3 molécules de chaux, l'alumine également jusqu'à 3 molécules de chaux et l'oxyde de fer jusqu'à 1 $\frac{1}{2}$ molécule. (Note du Dr H. Kühle. *Chem. ztg.*, 1914, p. 573).

Alumine. — Le ciment Portland contient habituellement 5 à 10 % d'alumine. Plus sa teneur en alumine augmente, plus il est à prise rapide. Lorsqu'elle dépasse 10 %, le ciment est à prise très rapide, et accuse une diminution correspondante de résistance à la traction. Ce fait s'explique, puisque la résistance du ciment est due au silicate de chaux et les conditions de sa prise à l'aluminate de chaux. Comme ce dernier est très fusible, les clinkers obtenus par la cuisson de mélanges riches en alumine sont très fusibles, difficiles à faire cuire uniformément et à broyer. Les clinkers de ciment fabriqués avec du kaolin accusent toutes ces propriétés et ne possèdent qu'une faible résistance à la traction.

Oxyde ferrique. — D'après Le Chatelier, l'oxyde ferrique et le carbonate de chaux donnent par la cuisson des produits qui s'hydratent avec l'eau et ne possèdent pas de propriétés hydrauliques. Schott, de son côé, a préparé avec de la chaux, de la silice et de l'oxyde ferrique du ciment de bonne qualité, se durcissant bien, et il en a conclu que l'oxyde ferrique pouvait très bien remplacer l'alumine sans diminuer en rien les propriétés hydrauliques du ciment. S. B. et W. B. Newberry ont conclu également de leurs recherches que l'oxyde ferrique et l'alumine exercent une action équivalente sur la combinaison de la silice avec la chaux.

Zullkowski a fait des expériences dans la même voie et ses conclusions concordent avec celles de Schott et Newberry. On admet généralement que l'oxyde ferrique agit dans le mélange brut comme fondant et favorise la combinaison de la chaux avec la silice. Les mélanges de silice, d'alumine et de chaux en proportions habituellement employées dans la fabrication du ciment, sont très difficiles à faire cuire. Si l'on remplace une partie de l'alumine par le fer, on peut abaisser considérablement la température de cuisson. C'est pourquoi on aurait tout avantage à remplacer les argiles riches en alumine par des argiles riches en fer.

Dans les mélanges riches en silice et par conséquent durs à faire cuire, l'addition au mélange d'un peu de minerai de fer aurait pour effet d'abaisser la température de scorification et de faciliter la production d'un ciment normal. Dans ces derniers temps, de nombreux savants qui font autorité en la matière ont recommandé les ciments à teneur élevée en oxyde ferrique, auxquels ils attribuent une grande résistance à l'action dégradante des sels de magnésie, etc., qu'on rencontre dans l'eau de mer. On a essayé de fabriquer un ciment de ce genre, dit *ciment de minerai*, mais on n'a pas tardé à y renoncer : ce produit revenait à un prix trop élevé, était peu avantageux à l'emploi et à prise trop lente.

La proportion d'oxyde ferrique dans les ciments est généralement inférieure à 5 %. La couleur gris brun du ciment est due à la présence de composés ferriques. Le ciment préparé avec de la silice, de la chaux et de l'alumine est incolore, mais si l'on

remplace l'alumine par l'oxyde ferrique, le produit prend une couleur grise.

Le Dr Hans Kühl (1) a fait des recherches dans le but de préciser l'importance qu'il convient d'attacher à l'oxyde de fer à côté de l'alumine dans le ciment. L'étude d'éprouvettes minces de ciments riches en fer et pauvres en fer fit ressortir tout d'abord l'importance du fer pour la petrographie du clinker. Les éprouvettes très pauvres en fer donnèrent une image typique dénuée de toute expression, tout différente de celle du clinker de ciment plus ou moins ferrugineux ou normal. La plupart des éléments de sa texture minérale sont colorés en jaune ou jaunâtre, ce qui tend à prouver que le fer du clinker ne se trouve pas seulement dans la célite et dans la scorie, mais encore, quand il est en quantité suffisante, dans l'alite et la bélite. Les éprouvettes de richesses moyenne et élevée en fer montrent des cristaux distincts parfaitement formés, dont les arêtes sont nettement reconnaissables même sous un faible grossissement, tandis que les mélanges pauvres en fer donnent des produits de granulation d'autant plus fine qu'ils contiennent moins d'oxyde de fer.

Il semble qu'il y a là un fait intéressant pour la technique, car les résultats de ces expériences montrent que la robuste formation du minéral clinker est due à la présence d'une quantité suffisante de fer et s'effectue avec le concours de la scorification. Or, la technique a le plus grand intérêt à ce que le clinker se forme dans les meilleures conditions possibles, car l'économie de fonctionnement du four et la qualité du produit en dépendant dans une large mesure. Il suffit de petites quantités de fer pour faciliter la scorification. Lorsque les matières premières dont on dispose sont pauvres en fer, on peut y suppléer par l'addition d'autres fondants capables de favoriser la scorification. Dans un cas pratique particulièrement intéressant, l'auteur réussit à améliorer sensiblement la cuisson d'une masse difficile à scorifier, en employant pour le chauffage du lignite d'un faible pouvoir calorifique, riche en cendres.

Une scorification réelle, telle qu'on l'envisage comme caractéristique du clinker de ciment Portland, n'est possible qu'autant que la masse contienne des éléments qui rendent possible la for-

---

(1) Dr Hans Kühl, *Chem. Ztg*, 1914, p. 573.

mation de scories relativement très fusibles, qui à leur tour servent de dissolvants pour les matières qu'il s'agit d'unir dans le produit. De ce point de vue, l'auteur signale les réserves avec lesquelles il convient d'accueillir les conclusions que l'on pourrait être tenté de tirer de l'examen du système ternaire pur au point pratique de la cuisson du ciment.

Dans le clinker normal le fer se trouve sous forme d'oxyde; il ne prend la forme d'oxydule qu'avec un feu réducteur, ce qui est une faute. En effet, l'oxydule de fer dans le ciment n'est pas un facteur hydraulique dans le sens habituel, car il ne peut fixer de chaux, contrairement à ce qui a lieu pour l'oxyde de fer. Comme résultat important de ses recherches, l'auteur a déterminé la quantité maxima de chaux que peut fixer l'oxyde de fer et la manière dont la chaux se répartit sur les différents facteurs hydrauliques dans les meilleurs ciments.

Magnésie. — Un ciment contenant 2,5 % de magnésie a été considéré pendant longtemps comme un produit douteux; actuellement un ciment à 4 % de magnésie est considéré comme normal et certaines autorités en admettent même jusqu'à 5 %. L'opinion commune est que le ciment à teneur un peu élevée en magnésie est sujet à changer de volume et à se fendiller. En 1885, K. Dyckerhoff a présenté à l'association des fabricants de ciment allemands les résultats de recherches approfondies sur ce sujet, dont il conclut que la magnésie, qu'elle soit ajoutée à un mélange normal ou substituée à une partie équivalente de chaux, produit dans le ciment qui en résulte une diminution de résistance lorsqu'elle s'y trouve dans une proportion supérieure à 4 % ; à 8 % de magnésie le ciment se fendille. Dans sa formule, Le Chatelier considère la magnésie comme pouvant être substituée à la chaux, tandis que MM. Newberry la considèrent comme inactive et inapte à remplacer la chaux.

Les avis sont partagés en ce qui concerne l'hydraulicité des silicates de magnésie. Ainsi, Lieven, Rivot, Kavalewski et Zulkowski ont tous préparé des ciments magnésiens, tandis que Newberry et Held n'ont pu y réussir. Il est probable cependant que si les silicates de magnésie possèdent une certaine hydraulicité, ils sont inférieurs aux silicates de chaux ; il s'ensuit que la magnésie est une cause d'infériorité pour le ciment vu qu'elle occupe la place d'une quantité correspondante de silicate de

chaux. La question de savoir s'il y a lieu de tenir compte de la magnésie dans le dosage des matières premières pour ciment revient à demander si elle se trouve combinée à la silice et à l'alumine dans le ciment. Si elle se combine, la matière doit contenir assez de silice et d'alumine pour la formation non seulement des composés calcaires proprement dits, mais encore des composés magnésiens, sinon le ciment est trop basique et contiendra probablement de la chaux non combinée. En résumé le taux de la magnésie (MgO) ne doit pas dépasser 4 % dans le ciment.

Se référant aux opinions contradictoires émises sur le ciment Portland riche en magnésie, et les résultats tout aussi contradictoires fournis par les expériences de Hentzel, Dyckerhoff, H. Kuhl et F. Blumenthal, R. Glasenapp (1) a jugé utile d'instituer des exppériences personnelles sur ce sujet. Tout d'abord il a remplacé tout le CaO d'un ciment Portland d'un module hydraulique de 2,0 par une quantité équimoléculaire de MgO ; par suite du poids moléculaire plus petit de MgO, le module hydraulique est devenu alors 1,44, ce qui correspond à la présence dans le clinker de 59 % de MgO et 41 % de silicate. Pour dissoudre le MgO dans le silicate, c'est-à-dire pour la formation d'alite magnésienne, il a fallu porter la température à 1700-1800° C., qui est beaucoup plus élevée que celle nécessaire pour la cuisson du ciment Portland normal. La pétrographie de ce ciment vu à la lumière, est absolument dénuée d'intérêt pour la pratique industrielle ; ce ciment, en effet, n'a réagi avec l'eau qu'au bout de 6-8 mois, en formant dans la préparation étudiée au microscope quelques rares aiguilles cristallines, composées manifestement de $MgO (OH)^2$. Dans ce laps de temps on ne put constater aucune formation de gel.

Passant ensuite à ses études sur le ciment Portland dolomitique, l'auteur rapporte qu'il a fait entrer dans le mélange brut de la dolomite normale cuite. Au module de chaux 2 correspond un module de dolomite (CaO.MgO) de 1,7. Ici encore l'auteur a poussé la cuisson jusqu'à la scorification, c'est-à-dire jusqu'à la formation d'alite de CaO.MgO qui s'est montrée sous le microscope sous forme de cristaux courts, noyés dans une masse prin-

(1) *Chem. Zeitung*, 1914, p. 589.

cipale amorphe, vitreuse. La cuisson à point de ce ciment s'effectue à une température finale de 1600° C., c'est-à-dire à une température comprise entre celle de cuisson du ciment normal et celle de cuisson du ciment magnésien. Au contact de l'eau, l'action du ciment dolomitique est pratiquement nulle. Malgré une teneur non négligable en chaux, la magnésie empêche complètement la formation des cristaux en aiguilles d'hydrosilicate de calcium qui, on le sait, se montrent en abondance dans le mortier de ciment Portland après la prise.

Eu égard aux résultats qu'il a obtenus, V. Glasenapp estime qu'il est impossible que CaO et MgO puissent se substituer l'un à l'autre dans le ciment Portland, ou même qu'ils puissent subsister l'un à côté de l'autre. La seule possibilité, quoique non vérifiée encore pratiquement, d'employer la magnésie avec le ciment Portland, consisterait d'après l'auteur à mélanger au ciment Portland de la magnésite cuite qui, par suite de sa faible scorification, se rapproche beaucoup du ciment Portland dans le durcissement et, probablement, n'exercera pas sur lui une influence défavorable.

Comme la magnésie fixée par le silicate est hydrauliquement inactive, ainsi que le montrent les recherches de l'auteur, la magnésie caustique MgO s'hydrate complètement quoique lentement sous forme d'une poudre fine, et se durcit alors en formant des monolithes d'une grande résistance. Plus fortement la magnésie est scorifiée, plus lentement elle se durcit.

Alcalis. — Tous les ciments contiennent de petites quantités de potasse et de soude, soit environ 0,75 %. Une grande partie des alcalis contenus dans les matières premières en est expulsée par la cuisson : des expériences faites à ce sujet par Meade ont démontré que la moitié de la potasse passe dans les gaz qui se dégagent du four pendant la cuisson. La soude, moins volatile, se dégage en quantité moindre. On admet que les alcalis agissent comme fondants et favorisent la combinaison de la silice et de l'alumine avec la chaux ; la justesse de cette hypothèse a été vérifié par Meade.

L'addition de petites quantités soit de carbonates, soit d'hydroxydes de potasse et de soude a pour effet de rendre le ciment à prise rapide ; par suite, on peut admettre que la présence d'une proportion un peu importante d'alcali produit le même ef-

fet. Lorsque la prise rapide du ciment est due à la présence des alcalis, on peut y obvier jusqu'à un certain point en élevant la température de cuisson afin de les volatiliser. Les ciments fabriqués avec les résidus d'alcalis contiennent souvent jusqu'à 2,5 % de potasse et de soude. Ces ciments ne donnent jamais de bons résultats. En résumé, la plupart des ciments de fabrication normale contiennent trop peu d'alcalis pour que ceux-ci puissent influer sur leur hydraulicité.

Soufre. — Le ciment contient différents composés sulfurés, dont les principaux sont le sulfate et le sulfure de calcium. Le sulfate de calcium a pour effet de retarder la prise du ciment. C'est pourquoi on l'ajoute toujours au ciment sous forme de gypse ou plâtre de Paris après la cuisson. On peut en ajouter jusqu'à 3 % au maximum pour obtenir du ciment à prise lente ; une proportion de 4 ou 5 % serait nuisible.

Unification de la teneur du ciment Portland en SO^3 (1). — La teneur maxima du ciment Portland en acide sulfurique fait l'objet de prescriptions spéciales dans les différents pays ; en France elle est de 3 % pour le ciment employé à l'eau douce, et de 1,5 % pour le ciment employé pour les constructions à la mer. Or, il résulte de recherches approfondies faites sur des ciments à différentes teneurs en acide sulfurique que la présence de 2,50 % de SO^3 dans le ciment Portland destiné aux travaux à la mer est absolument inoffensive. Dans des constructions faites dans la mer du Nord on a obtenu de bons résultats avec du ciment à 2,5 % d'acide sulfurique, tandis que du ciment à 0,57 % de SO^3 fourni spécialement pour travaux à la mer a donné de mauvais résultats, et a été sensiblement amélioré quand on eût porté sa teneur en SO^3 à 2,5 %. L'analyse chimique a d'ailleurs montré que le béton de ciment à 0,57 % de SO^3 avait été sensiblement détérioré par l'eau de mer, tandis que celui fait avec du ciment à 2,5 % de SO^3 n'avait été que faiblement altéré. L'Union des fabricants de ciment allemands en a conclu (1912) que la présence de 2,5 % de SO^3 dans le ciment n'est pas plus nuisible dans l'eau de mer que dans l'eau douce; en conséquence, elle a fixé à 2,5 % la teneur maxima admissible pour tous les ciments quelle que soit leur destination, tout en se réservant de soumettre cette

(1) *Chem. Ztg*, 1913, pp. 119-521.

question à une commission internationale pour plus ample examen.

Eau et acide carbonique. — Tous les ciments contiennent de l'eau et de l'acide carbonique en proportions variables suivant l'âge du ciment. Les ciments nouvellement broyés contiennent généralement moins de 1 % de ces deux éléments à l'état combiné, tandis qu'après un temps normal de magasinage ils en contiennent jusqu'à 3 et 4 %. Il est possible d'expulser tout l'acide carbonique des matières premières par la cuisson, sans pour cela amener la masse au commencement de vitrification nécessaire pour obtenir du clinker de bonne qualité. La perte à la calcination (eau et acide carbonique) peut n'être pas plus élevée pour les échantillons de clinker insuffisamment cuit que pour ceux de clinker bien cuit. Si les échantillons sont exposés à l'air, ils absorbent de l'eau et de l'acide carbonique qui seront ensuite expulsés à la calcination et donneront une perte correspondante. Une partie de l'eau peut être expulsée à 110° C., mais les derniers restes ne peuvent l'être qu'à la température du rouge sombre. D'ailleurs, la détermination des pertes à la calcination ne peut guère renseigner sur la qualité du ciment, hormis les cas où ces pertes sont très élevées, puisqu'il est reconnu que celui-ci peut absorber jusqu'à 4 % de matières volatiles pendant sa conservation normale et que cette conservation a pour effet de l'améliorer. Aussi, les « Standard spécifications » pour l'Amérique n'imposent-elles aucune limite pour la perte à la calcination.

Autres éléments contenus dans le ciment Portland. — En dehors des éléments susmentionnés, on trouve encore dans le ciment les acides titanique TiO^2 et phosphorique P^2O^5, de l'oxyde ferreux FeO, de l'oxyde de manganèse MnO, et de l'oxyde de strontium SrO. Mais, étant donnée la faible quantité de ces éléments dans les ciments du commerce, on ne peut guère leur attribuer d'influence sur l'hydraulicité et le temps de prise. Il est probable que le titane peut être substitué à la silice, mais le ciment serait alors difficile à faire cuire; le manganèse agit comme fondant, et on a même fabriqué des ciments dans lesquels le strontium remplaçait la chaux.

Variétés de Ciment Portland

CIMENT BLANC (1)

On distingue le ciment blanc naturel et le ciment blanc artificiel. Parmi les ciments blancs naturels, ceux de Pavin de Lafarge, cuits dans des fours chauffés au gaz sont incontestablement les plus beaux. De nombreux expérimentateurs ont cherché à les reproduire artificiellement. Parmi ces derniers, on peut citer Fåhnjelm, Enemann, Ransonne, Berkefeld, Zulkowski, Wormser, Gressly; mais aucun de ces chercheurs n'est arrivé à produire un portland blanc réellement utilisable.

Le procédé Fahnjelm consiste à faire cuire un mélange composé uniquement de craie et de kaolin.

En mai 1899, M. Enemann ajoutait du feldspath comme fondant au mélange de craie et de kaolin. On ajoutait à la craie nécessaire un mélange composé de 4 parties de kaolin et 6 de plagioclase. Le ciment obtenu avait sensiblement la composition suivante :

Silice	22,868
Alumine	10,400
Soude	2,707
Chaux	64,025

Ransonne cherchait à obtenir un ciment blanc en faisant cuire en vase clos un mélange de silice, d'argile blanche et de chaux.

Berkefeld remplaça, sans plus de succès que les précédents, l'argile par de la terre d'infusoires. Zulkowski, se rendant compte de la nécessité d'ajouter du fondant, eut l'idée d'ajouter de l'acide borique. En frittant énergiquement un mélange de craie, d'argile blanche et d'acide borique, il obtenait un ciment blanc, se durcissant rapidement.

Le Dr Wormser (2) a imaginé un procédé ayant pour objet d'obtenir du ciment blanc en partant d'argiles et de marnes ordinaires et même ferrugineuses. A cet effet, il ajoute à la masse crue 2 à 5 % de chlorhydrate d'ammoniaque, qui lors de la cuisson transforme le fer en chlorure, lequel est volatil et s'échappe avec les fumées. En faisant barboter dans l'eau ces fumées, qui

(1) Cf. *Rev. des Matér. de constr.* 1910, p. 98 et suiv.
(2) *Tonindustrie Ztg.*, 8 février 1908.

renferment du chlorhydrate d'ammoniaque, du chlorure de fer et de l'ammoniaque, on peut aisément récupérer le chlorhydrate.

La cuisson doit se faire dans de petits fours verticaux, ce qui augmente les frais de fabrication; il est vrai que le produit est d'un prix supérieur. Si l'on ne tient pas à obtenir un ciment Portland absolument blanc on peut du reste réaliser une économie en remplaçant le sel ammoniac par du chlorure de zinc; le produit obtenu retient toujours un peu de ce dernier et est légèrement teinté de vert.

M. Gressly, en Suisse, a essayé de fabriquer un ciment romain blanc à prise rapide. Le produit qu'il a obtenu a sensiblement la composition suivante :

Silice	17
Alumine	12,595
Sesquioxyde de fer	0,15
Chaux	51,54
Magnésie	0,22
Acide sulfurique	3,16
Pertes au feu	14,95
Pertes et non dosés	0,02

Les roches sortant du four sont relativement blanches, peu cuites, légères, spongieuses.

On remarquera immédiatement que ce produit renferme une quantité considérable d'acide sulfurique. De plus, sa prise est tellement rapide qu'on est obligé de l'aérer en le laissant exposé à l'air pendant un temps assez long pour pouvoir l'employer. C'est ce qui explique la perte au feu de près de 15 % donnée à l'analyse citée plus haut. Ce ciment n'est donc pas, comme l'a reconnu du reste très loyalement l'inventeur, du ciment portland, mais un petit ciment peu cuit, à prise extrêmement rapide, instantanée, dont l'emploi ne saurait se généraliser.

Le ciment blanc fabriqué par l'usine Stern contient les éléments suivants (1) : 63,75 % de CaO, 17,35 % de SiO^2 soluble, 2,26 % de SiO^2 insoluble, 13,75 % d'Al^2O^3, 1,63 % de SO^3 et en outre un peu d'oxyde de fer et d'autres bases. Comme la majeure partie de l'oxyde de fer est remplacée par l'oxyde d'aluminium, le clinker ne contient pas d'alite, mais de la bélite, et une masse faiblement bi-réfringente, qui est vraisemblablement une

(1) Glasenapp, *Chem. Ztg*, 1913, p. 523.

masse amorphe de remplissage. La poudre de ciment blanc se distingue de celle du ciment Portland en ce sens qu'elle contient une plus grande quantité de substances colloïdales. Celles-ci se solidifient lentement, de sorte que le ciment est à prise lente. Il ne s'en distingue pas moins par ses qualités de haute résistance.

Depuis peu de temps on fabrique un véritable Portland blanc appelé commercialement glyptolithe ou hermine; l'inventeur du procédé se sert uniquement de craie et de kaolin, la craie pouvant être remplacée par la chaux.

D'après les renseignements contenus dans les procès-verbaux d'essais, les matières premières employées ont la composition suivante :

	Kaolin	Kaolin	Chaux
Silice et matières insolubles dans les acides.	»	»	0,49
Silice	49,99	45,24	»
Alumine	36,18	37,51	»
Sesquioxyde de fer	0,73	0,97	0,24
Chaux	0,72	2,57	91,93
Magnésie	0,18	0,31	1,32
Anhydride sulfurique	traces	traces	traces
Perte au feu	11,24	13,950	6,15
Pertes et non dosés	0,96	»	»
Total	100,00	100,00	100,00

Le ciment produit à la composition suivante :

Matières insolubles dans les acides et les alcalis	0,15
Alumine	18,25
Sesquioxyde de fer	0,25
Chaux	62,50
Magnésie	néant
Anhydride sulfurique	0,20
Perte au feu	4,95
Non dosés et pertes	0,25
Total	100,00

Si l'on examine le module hydraulique de ce ciment, c'est-à-dire le rapport chaux : silice combinée + alumine + sesquioxyde de fer, on voit que ce module est égal à 1,97, presque le module théorique de 2 indiqué par Michaelis comme étant la caractéristique du Portland artificiel.

D'après les essais exécutés, l'expansion du ciment est nulle. Cet essai a été exécuté, comme on le fait habituellement en France, par application de la méthode Le Chatelier, en immergeant des

cylindres confectionnés en pâte de ciment pur dans de l'eau bouillante pendant cinq heures. Cette immersion a eu lieu, comme l'indique le procès-verbal, après 24 heures d'immersion dans l'eau froide.

Les résistances à la traction en mortier plastique 1 : 3 sont bonnes; c'est ainsi qu'on a obtenu 8 kg après deux jours et 11 kg après une semaine. Rappelons, pour comparer ces résistances à celles données par les ciments ordinaires essayés en Allemagne, qu'en France cette résistance est déterminée sur des mortiers plastiques non battus.

La proportion de fer (0,25 %) est extrêmement faible, ce qui explique la blancheur de ce produit.

Dans un autre procès-verbal d'essais, il est dit que la pâte pure essayée à la traction a donné 10,8 kg. après 2 jours et 18 kg. après 28 jours. Des essais à la compression ont donné 424 kg après une semaine et 457 après quatre semaines. Ces essais ont été exécutés sur des cylindres ayant 50 mm. de hauteur et 50 mm. de diamètre.

Une propriété que ce ciment possède tout particulièrement, est de pouvoir être appliqué comme enduit en plein hiver sans aucune crainte de gelée. C'est ainsi que dans un procès-verbal il est dit que des briquettes en pâte pure et en mortier ont subi avec succès l'essai de gélivité consistant en 25 gels à — 15° et 25 dégels à + 15°.

Ces essais démontrent de la façon la plus nette que ce produit est susceptible d'être employé comme enduit à l'extérieur, sans avoir rien à craindre du climat le plus rigoureux.

Un autre essai indique les résistances de 365 kg à la compression après six mois d'exposition dans une atmosphère saturée d'humidité.

Ce ciment blanc a été employé à la décoration intérieure du casino de Vichy. Il vient d'être appliqué également pour revêtement, rue d'Alsace à Paris. Ce revêtement a été exécuté pour restaurer et surélever un petit hôtel particulier.

Enfin, il y a une autre application extrêmement intéressante du ciment blanc, susceptible d'acquérir un développement considérable. Comme on le sait, ce qui empêche l'extension des constructions particulières en ciment armé, c'est cette teinte grise uniforme sans chaleur, cette teinte morte que possède le ci-

ment lui-même. Aussi, dans les villes, où l'on aime les décorations artistiques, le béton armé à cause de sa teinte grise uniforme n'a pas pris l'extension qu'il devait prendre.

Le ciment portland blanc étant d'une fabrication identique à celle du portland ordinaire, et ses éléments étant sensiblement les mêmes, il s'ensuit qu'il doit y avoir accord parfait entre ces deux matières. On sait dans l'industrie céramique, que si l'on place un émail ne s'accordant pas avec la pâte de support, il arrive qu'après un certain temps il se produit des craquelures à la surface de l'émail, par suite de la différence des coefficients de dilatation. Il en est de même dans les façades en ciment armé si l'on veut revêtir le ciment d'un produit différent. Si au contraire le produit de revêtement, comme dans le cas actuel, est un véritable portland blanc, il y aura accord parfait entre les deux ciments.

Un autre emploi du ciment blanc, emploi qui fera la joie des architectes, c'est de pouvoir être moulé et de produire les ornements les plus délicats.

De deux procès-verbaux, exécutés l'un au laboratoire de Gross-Lichterfeld-West, l'autre à Paris, il résulte que ce ciment blanc peut être additionné de silicate de soude pour en couler des objets d'une délicatesse exquise comme le montrent les photographies annexées au procès-verbal du laboratoire de Gross-Lichterfeld.

Il est bien entendu que pour cette manipulation on emploie un mélange de sable et de ciment, que l'on additionne de silicate de soude.

D'après de nombreux procès-verbaux d'essais exécutés avec le ciment additionné de silicate, un bloc exposé pendant 18 mois aux intempéries ne présente aucune trace de fissure; un second bloc sur lequel on a exécuté le même essai s'est comporté de la même manière; un troisième bloc après 3 mois ne présente aucune trace de fissure; un quatrième a donné lieu aux mêmes constatations, un cinquième également après 18 mois d'exposition. Ces résultats permettent de se faire une opinion en toute connaissance de cause.

Un autre procès-verbal d'essais montre qu'un moulage représentant une feuille d'acanthe a subi l'essai, pourtant si sévère, de gélivité avec plein succès : 25 gels à — 15 degrés et 25 dégels à + 15° n'ont amené aucune désagrégation dans la masse.

On peut également employer ce produit pour l'imitation de la pierre, en incorporant au ciment une proportion plus ou moins considérable de pierre broyée. De nombreuses applications ont été faites à Paris, en additionnant le ciment de pierre calcaire. Ainsi un procès-verbal d'essai montre qu'un bloc de ciment imitant la pierre d'Euville a donné une résistance de 195 kg à la compression.

Enfin un essai qui peut avoir son intérêt montre que des blocs de ciment résistent parfaitement à une température de 800° C., ce qui, on le sait, est une des caractéristiques du véritable Portland.

Il résulte de ces faits, que les architectes, entrepreneurs, fabricants d'objets en ciment, ont à leur disposition un ciment Portland blanc ayant toutes les qualités de résistance et de liaison du Portland artificiel et toute l'apparence des plus belles pierres.

CIMENT A BASE DE MINERAI (1)

Ce nouveau ciment, fabriqué et mis en vente en Allemagne sous le nom de Erzzement, marque « Aegir », suivant le procédé breveté sous le n° 143.604 des Usines de Hemmoor, près Cuxhaven, est caractérisé par la substitution de l'oxyde de fer à l'alumine. Il doit donner de bons résultats pour les travaux à la mer, les tunnels, etc., où le ciment Portland ordinaire se comporte mal. Les matières premières qui entrent dans sa fabrication sont : 1° du calcaire pur à 99,5 % de $CaCO^3$; 2° du quartz pulvérisé à un extrême degré de finesse; 3° de l'oxyde de fer finement pulvérisé, constitué par de la limonite ou un autre minerai de fer. Après mouture du quartz et de l'oxyde de fer à l'état sec, les trois matières sont gâchées à un état d'extrême finesse, ne donnant qu'un résidu de 5 % au tamis de 5.000 mailles. Après séchage, cette pâte donne par cuisson au four rotatif une roche qui, additionnée d'un peu de plâtre et moulue, donne le ciment à base de minerai.

Les essais comparatifs effectués sur ce produit et sur 12 ciments Portland allemands de bonne qualité ont donné des résultats satisfaisants. Les expériences ont été faites à l'eau douce, à

(1) A. W. Thrackera. — *Engineering News.* XLIX, p. 702 — *Rev. des matér. de Constr.*, octobre 1909.

l'eau de mer ordinaire et enfin dans de l'eau trois à cinq fois plus salée que l'eau de mer. Il a été également fait des éprouvettes contenant 2 %, 5 %, et jusqu'à 40 % de plâtre moulu, c'est-à-dire des quantités qui amèneraient sûrement la destruction des ciments Portland.

Après trois années, les éprouvettes de ciments Portland à haute teneur en gypse étaient effectivement détruites, tandis que les éprouvettes correspondantes de ciment à base de minerai étaient encore intactes. Les autres essais comparatifs ont été également favorables à ce produit.

La direction des usines de Hemmoor conclut de ces expériences que les travaux effectués avec le nouveau ciment dans l'eau de mer, dans les houillières, les exploitations de potasse, etc., c'est-à-dire partout où il y a à craindre l'action des sulfates, doivent être plus durables que les travaux faits en ciment Portland. Les dépenses de construction sont, il est vrai, plus fortes, en raison du prix plus élevé du nouveau produit, mais la différence est négligeable en comparaison des avantages qui viennent d'être exposés.

Mais, comme nous le disions plus haut, malgré sa haute résistance à l'action des agents chimiques, ce ciment n'a pu se maintenir. Sa fabrication présente des difficultés; il revient à un prix très élevé et il est peu avantageux à l'emploi.

CHAPITRE III

LES MATIÈRES PREMIÈRES DU CIMENT PORTLAND ET DES CIMENTS POUZZOLANIQUES

LA CHAUX

La chaux (oxyde de calcium CaO) constitue le principal élément du ciment Portland. Elle ne se rencontre jamais à l'état libre dans la nature, mais combinée le plus souvent avec les acides carbonique, sulfurique et silicique. Parmi ces composés, le carbonate de chaux est de beaucoup le plus important. On le trouve sous deux modifications : sous forme de spath calcaire cristallisant en rhomboèdres d'un poids spécifique de 2,7, et sous forme d'arragonite cristallisant en aiguilles rhombiques, d'un poids spécifique de 2,9. Leur composition chimique est de 56 % CaO + 44 % CO^2 ils donnent donc à la cuisson une chaux absolument pure.

Le calcaire se rencontre souvent sous une forme pulvérulente et terreuse; on se trouve alors en présence de la craie, qui peut contenir jusqu'à 45 % d'humidité naturelle.

Presque toutes les pierres calcaires contiennent des impuretés, telles que : silice, alumine, sable, oxyde de fer, magnésie, acide sulfurique, etc. L'impureté qui joue le rôle le plus important, quand elle se trouve en quantité un peu importante, est la magnésie. Les pierres calcaires composées principalement de carbonate de chaux et de magnésie constituent les *dolomites*, qui contiennent à l'état normal, 54,3 % $CaCO^3$ et 45,7 % $MgCO^3$. Leur principale caractéristique est de se dissoudre plus difficilement dans les acides que les calcaires non dolomitiques, ce qui permet de les distinguer assez facilement par l'analyse. En outre, elles commencent à dégager leur acide carbonique à la tem-

pérature de 400° (celui de la magnésie) et se cuisent dès lors à une température moins élevée.

Pour le choix des pierres calcaires au point de vue de leurs emplois industriels, on se base sur leur degré de pureté, mais c'est principalement leur teneur en alumine qui en décide. La proportion de cette dernière nous fournit toute une série de matières différentes, depuis le calcaire faiblement marneux jusqu'à l'argile presque pure. Ainsi, on distingue :

la pierre calcaire, à teneur très faible en argile;

le calcaire marneux, contenant jusqu'à 15 % d'argile;

la marne, contenant jusqu'à 30 % d'argile;

la marne argileuse, contenant jusqu'à 75 % d'argile;

l'argile proprement dite, contenant plus de 75 % de matière argileuse.

Soumises à la cuisson, les pierres calcaires pures ou à peu près donnent de la chaux grasse, celles qui sont moins pures donnent de la chaux maigre ou chaux hydraulique. Lorsque la teneur en argile augmente, on se trouve en présence de marnes. Celles-ci se rencontrent souvent en couches irrégulières, alternant avec d'autres matières, de sorte que leur extraction exige de grands soins pour fournir des produits utilisables. On les rencontre spécialement dans le tertiaire, dans le crétacé, dans le jurassique; suivant leur teneur en argile, elles fournissent les matières premières pour la chaux hydraulique, pour les ciments Portland naturels et artificiels, pour les ciments romains, et enfin des additions au ciment Portland artificiel.

D'une manière générale, on peut affirmer que la chaux marneuse convient mieux pour la fabrication du ciment Portland que le carbonate de chaux pur, car les deux composants essentiels s'y trouvent en mélange tellement intime que les appareils mélangeurs les plus parfaits ne pourraient le réaliser. Il suffit généralement d'y ajouter de petites quantités de matières argileuses ou argilo-siliceuses pour lui donner la composition exacte du ciment, laquelle, comme on l'a vu plus haut, ne doit varier que dans des limites très étroites.

On trouve aussi, quoique plus rarement, des marnes qui, calcinées jusqu'à la scorification, fournissent du ciment sans le secours d'aucun mélange. Les marnes de ce genre se rencontrent

à Noworossisk, sur les bords de la Mer Noire, à Perlmoos en Tyrol, à Gartenau près Salzbourg, à Spalato (Dalmatie), etc.

D'après les recherches exécutées par Ljamin (Institut des ingénieurs des Voies et communications de l'empereur Alexandre I[er]), la marne des côtes de la mer Noire a la composition suivante :

Matières volatiles	35,64	%
Terre siliceuse	13,48	»
Argile	4,77	»
Oxyde de fer	1,35	»
Chaux	44,45	»
Magnésie	0,10	»
Acide sulfurique	traces	

L'ARGILE

Le second élément essentiel des matières premières pour ciment est l'*argile*, c'est-à-dire un mélange d'alumine, de silice, d'oxyde de fer et d'alcalis, auxquels viennent s'ajouter souvent encore de la chaux et de la magnésie. L'argile est un produit d'effritement de roches alumineuses appartenant le plus souvent au groupe du feldspath; sa composition chimique et ses propriétés physiques présentent une importance primordiale pour la fabrication du ciment.

L'argile se rencontre dans toutes les formations géologiques; on en trouve également des dépôts dans la mer, quoique rarement; mais dans ce cas elle est exempte de chaux, car celle-ci est dissoute par l'eau de mer. Son poids spécifique est en moyenne de 2,25.

Suivant la nature et la teneur des impuretés, c'est-à-dire des éléments accessoires, on distingue les argiles *maigres* et les argiles *grasses*.

Les argiles maigres ne sont autre chose que la roche primitive effritée. Elles sont peu ou point plastiques, riches en bisilicates d'alumine ($2\ SiO^2Al^2O^3 — 2\ H^2O$) et en sable, mais pauvres en fondants. Elles constituent les argiles réfractaires.

Les argiles grasses sont plus ou moins plastiques, contiennent peu de sable et sont pauvres en fragments de roche primitive, par conséquent elles contiennent peu de bisilicates d'alumine, mais une importante proportion de fondants; elles sont donc très fusibles.

Entre les argiles maigres, réfractaires, non plastiques et les argiles grasses très fusibles, plastiques, se placent les argiles peu fusibles, passablement riches en fragments de roches primitives. Elles contiennent une proportion élevée de fondants, mais elles sont plus pauvres en CaO et MgO que les argiles très fusibles.

Les argiles réfractaires, peu fusibles, sont principalement employées dans l'industrie de la céramique et des produits réfractaires.

Dans la pratique on détermine le degré de réfragarité (1) à l'aide des cônes normaux de Seger. Ceux-ci servent principalement à faciliter le contrôle exact de la cuisson, de la scorification et de la fusion ; ils sont devenus presque indispensables dans la fabrication du ciment avec les anciens fours.

Les argiles réfractaires peu fusibles sont impropres à la fabrication du ciment, à moins qu'on ne modifie leur composition par l'addition de certains fondants, comme par exemple le spath fluor, le manganèse, etc. On n'emploiera pour cette fabrication que les argiles plastiques, très fusibles.

Comme impuretés gênantes pour l'industrie des ciments, il y a lieu de citer les pyrites sulfureuses et le sable.

Si le sable se trouve en proportion importante et en gros grains, il est nécessaire d'en débarrasser l'argile par l'application du procédé humide; avec un four convenablement choisi le sable fin est moins gênant vu que dans la cuisson il fond complètement. L'argile russe qui figure dans nos analyses ci-dessous est de ce genre ; la majeure partie de la silice s'y trouve sous forme de sable de quartz très fin.

On voit par ce qui précède que la composition chimique des argiles est excessivement variable. Ce sont des matières dénuées de toute individualité chimique bien définie, chaque sorte d'argile représentant elle-même une entité distincte, et il n'existe peut-être pas une substance qui présente ce caractère au même titre. Les analyses suivantes (dont les n°s 1 à 4 sont du Dr Michaelis et le n° 5 de Feichtinger) pourront servir de points de repère pour juger de la valeur d'une argile.

---

(1) Nous disons *réfragarité*. Ceux qui n'ont pas fait leurs humanités écriront *réfractairité*, qui n'est pas français.

Silice	60,06	59,25	60,00	62,48	68,45
Alumine	17,79	23,12	22,22	20,00	11,64
Oxyde de fer	7,08	8,53	8,99	7,33	14,80
Chaux	9,92	»	4,18	6,30	0,75
Magnésie	1,89	2,80	1,60	1,16	»
Potasse	2,50	1,87	1,49	1,74	1,90
Soude	0,73	1,60	0,72	0,37	2,10
Gypse	0,60	2,73	0,89	0,60	»

Ces analyses se rapportent à la matière anhydre et exempte d'acide carbonique.

La silice est un des éléments les plus importants et les plus actifs de l'argile au point de vue de la fabrication du ciment; elle doit se trouver notamment sous une forme très soluble. La silice est par elle-même presque infusible, la présence d'alcalis et d'oxyde de fer a pour effet d'abaisser considérablement son point de fusion, et de la rendre apte à former avec la chaux des combinaisons insolubles.

Le Dr Schoch a démontré que les ciments riches en silice sont à prise plus lente que ceux riches en alumine, qui sont à prise rapide. Par contre, les ciments riches en silice se durcissent rapidement dès le début et sont de beaucoup supérieurs aux autres, surtout pour les applications sous l'eau de mer.

L'essentiel est que le ciment contienne la silice, les sesquioxydes et la chaux en proportions convenables, ainsi qu'on le verra plus loin.

POUZZOLANES

Comme nous l'avons déjà fait observer plus haut, les pouzzolanes ne sont employées que comme matières additionnelles ; elles exigent le concours de l'hydrate de chaux pour donner du mortier hydraulique.

Il y a peu de temps encore on ne connaissait que les pouzzolanes naturelles, qui sont : la terre de Santorin, la pouzzolane proprement dite et le trass. Dans ces derniers temps on les a remplacées partiellement par des produits artificiels, tels que le laitier de haut-fourenau, le verre en poudre, la poudre de briques, l'argile calcinée, les cendres de houille, etc., en tant que ces matières contiennent une proportion suffisante de silice en état de se combiner.

La *terre de Santorin* est d'origine volcanique ; on la trouve

dans certaines îles de la Grèce et plus spécialement à l'île de Santorin (Cyclades), d'où elle tire son nom. Elle forme un tuff assez friable, d'un poids spécifique de 2,4, et qui se réduit parfois spontanément en poudre. Elle se distingue par une teneur particulièrement élevée en silice libre, amorphe ; elle a la composition moyenne suivante (1).

	I		II
Eau	4,06	%	4,29
Silice	66,37	»	65,43
Titane	»		0,69
Alumine	13,72	»	15,01
Protoxyde de manganèse	»		0,50
Oxyde de fer	4,31	»	3,94
Chaux	2,98	»	2,84
Magnésie	1,29	»	1,06
Alcalis	7,05	»	7,61

La terre de Santorin doit être employée exclusivement en addition au ciment pour constructions sous l'eau ; elle donne un mortier inutilisable à l'air.

La *terre de pouzzolane* se rencontre principalement en Italie ; on en trouve également de petites quantités en France. Elle forme un tuff rocheux d'origine volcanique, qui donne une poudre brun rougeâtre d'un poids spécifique de 2,4. Sa composition est également très variable, ainsi que le montrent les chiffres suivants :

Eau	jusqu'à 12 %
Silice	52 à 60 »
Alumine	9 à 21 »
Oxyde de fer	5 à 22 »
Chaux	2 à 10 »
Magnésie	jusqu'à 2 »
Alcalis	3 à 16 »

Le *trass*, sorte de tuff rocheux, se rencontre principalement en Allemagne. Il forme des masses plus compactes que la terre de Santorin et possède un poids spécifique de 2,3. Il est de couleur gris-bleu, ce qui le distingue du pseudo-trass, cendre volcanique qui ne possède qu'une faible hydraulicité et qui recouvre généralement les couches de trass proprement dit.

Sa composition est à peu près la suivante :

(1) I Feichtinger, II Michaelis.

Eau	3 à 12 %
Silice	49 à 59 »
Alumine	10 à 19 »
Oxyde de fer	4 à 12 »
Chaux	1 à 8 »
Magnésie	1 à 7 »
Alcalis	3 à 10 »

Les gisements de trass abondent surtout aux environs d'Andernach où ils sont l'objet d'une exploitation assez importante. La matière est moulue sur place ou expédiée en morceaux.

Les trois sortes de pouzzolanes que nous venons de mentionner perdent leur eau sous l'action de la chaleur : elles possèdent la propriété assez curieuse de perdre leur hydraulicité partiellement ou totalement par la déshydratation. Par conséquent, il y a lieu de tenir compte de leur teneur en eau chimiquement combinée, ce qui a amené le prof. Tetmajer à se baser pour apprécier leur valeur au point de vue de leur addition au ciment, sur leur teneur en eau combinée chimiquement (c'est-à-dire sur leur perte à la calcination à 110°). Tetmajer est d'avis que ces matières ont été modifiées au moment de leur formation par des pluies éruptives.

Enfin, la *terre d'infusoires* constitue une autre pouzzolane naturelle et peut être utilement ajoutée au ciment pour travaux à la mer. On en trouve des gisement puissants en Auvergne et sur d'autres points de la France. Elle se présente sous forme d'une poudre légère, blanche ou vert brunâtre, maigre au toucher, craquant sous les dents. Elle se compose presque entièrement de silice active, d'un peu d'oxyde de fer, d'alumine, de chaux, de magnésie, de matières organiques et d'eau. Elle se combine facilement avec la chaux en excès du ciment Portland et constitue avec elle un excellent élément de liaison dans le mortier (SiO^2 CaO).

L'addition de terre d'infusoires permet donc d'améliorer considérablement les propriétés chimiques et mécaniques du mortier de ciment. La seule précaution à prendre est de faire sécher parfaitement la terre d'infusoires avant de la mélanger au ciment. D'un essai comparatif fait par Paulsen (1) avec la terre

(1) VI[e] Congrès internat. pour le contrôle des matériaux de construction, tenu à New-York du 2 au 8 sept. 1912.

d'infusoires et du trass pur, il résulte que la première contient à peu près deux fois plus d'éléments neutralisants de la chaux que le second, ainsi que le montrent les chiffres suivants :

	Trass pur	Terre d'infusoires
Silice soluble	22,6 %	51,6 %
Alumine soluble	8,0 »	8,5 »
Ensemble	30,6 %	60,1 %

Scories de haut-fourneau. — Comme nous l'avons dit plus haut, on a proposé de remplacer les pouzzolanes naturelles par diverses matières, et cette tentative a été couronnée de succès. La seule condition requise est que ces matières contiennent de la silice combinable en grande proportion.

Parmi toutes ces matières, les scories de haut-fourneau présentent un grand intérêt, car elles sont beaucoup employées à la fabrication du ciment Portland, tandis qu'au début elles ne pouvaient servir que comme matières additionnelles dans la fabrication du ciment artificiel de pouzzolane ou, plus exactement, de ciment de laitier.

CALCUL DES MÉLANGES POUR CIMENT PORTLAND

Comme nous l'avons vu plus haut, la composition chimique du ciment Portland varie dans des limites très étroites. Il s'ensuit que pour obtenir un ciment à prise normale et de résistance convenable, il est indispensable de doser correctement les matières premières, de manière à ce que la silice et l'alumine d'une part, la chaux de l'autre se trouvent dans un rapport déterminé. Les ciments produits dans différentes usines se distinguent souvent les uns des autres par leur teneur en silice, en chaux et en alumine, et cependant ils paraissent tout aussi bons les uns que les autres. La différence est due souvent à l'addition de plâtre, au mélange des cendres du charbon dans le four rotatif et à l'absorption d'acide carbonique de l'air. Il est évident toutefois que les variations sont dues le plus souvent aux différences de composition des matières premières dont proviennent les ciments.

Bien des efforts ont été tentés pour asseoir le calcul des mélanges pour ciment sur des bases vraiment scientifiques. On a réussi tant qu'il ne s'est agi que d'une seule et même usine; car, avec un peu d'expérience et d'esprit d'observation, il est relati-

vement facile de formuler une règle dont l'application donnera de bons résultats pour l'usine en question ; mais elle est en défaut dès qu'on cherchera à l'appliquer ailleurs. Cependant, à mesure qu'augmentent nos connaissances sur la constitution du ciment Portland et sur le rôle joué dans la scorification par les alcalis, le fer, etc., nous devons pouvoir établir avec une plus grande précision la composition des mélanges bruts.

Le Dr Michaelis, Le Chatelier et Newberry ont proposé des formules pour le calcul des mélanges. Le Dr Michaelis base sa formule sur ce qu'il apelle le « module hydraulique », facteur représentant le rapport qui existe, dans le mélange des matières premières pour ciment, entre la chaux et les silicates pris dans le sens général, par conséquent : silice + alumine + oxyde de fer) ; il l'exprime par la formule suivante :

$$M = \frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3 + FeO^3}.$$

Dans les ciments de Portland analysés par lui, Michaelis trouva que ce rapport était en moyenne = 2, c'est-à-dire que sur 2 parties de chaux (poids), il y avait 1 partie de silicates; il remarqua, en outre, que ce rapport était très étroit et qu'on ne devait pas s'en écarter sensiblement, la limite maxima étant de 2,2 et la limite minima de 1,8. Si l'on dépasse la première, on s'expose à obtenir un ciment expansif dans lequel, par suite de l'excès de chaux, celle-ci se combine incomplètement; il s'ensuit qu'après le durcissement du mortier, la partie non combinée s'hydrate, se dilate et détériore la maçonnerie. Si, au contraire, on reste en deça du coefficient inférieur d'hydraulicité, si par exemple on n'a que 1,8 de chaux sur 1 de silicates, on obtient un ciment qui s'effrite au refroidissement. Le mieux à faire, en calculant la proportion du mélange, est de s'en tenir à la valeur moyenne en prenant M = 2, qui, comme le montre l'expérience, est applicable aux matières premières de toutes natures pour la fabrication du ciment.

Un exemple donné par le Dr Michaelis fera mieux comprendre ce qui précède.

L'analyse des matières premières (sèches) : craie, marne ou chaux donne :

c^1 % chaux et s^1 % silicate ($SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3$). Celle de l'argile sèche donne :

c^2 % chaux et s^2 % silicates ($SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3$); x désignera alors le module hydraulique.

Ensuite s^1 parties de silicates exigent dans la pierre calcaire $x \times s^1$ parties de chaux, de sorte qu'il ne reste pour l'argile que $c^1 - x = s^1$ parties de chaux.

D'un autre côté, c^2 parties de chaux exigent dans l'argile $\frac{c^2}{x}$ parties de silicate qu'il faut retrancher de s^2 parties. Il ne reste donc que $s^2 - \frac{c^2}{x}$ parties de silicate pour la combinaison avec la chaux.

$s^2 - \frac{c^2}{x}$ indiquent par conséquent la quantité de pierre à chaux exigée par l'argile, et $c^2 - x \times s^1$ la quantité d'argile nécessaire à la chaux. Le module exige que la première formule soit multipliée par x :

$$\frac{\text{Pierre calcaire}}{\text{Argile}} = \frac{x\left(s^2 - \frac{c^2}{x}\right)}{c' - xs'} = \frac{xs^2 - c^2}{c' - xs'}.$$

L'exemple suivant montre l'usage de la formule pour la chaux et l'argile :

Chaux			Argile		
SiO^2	2,5 %	5 %	SiO^2	55,7 %	81.2 %
Al^2O^3	1,4 »		Al^2O^3	17,2 »	
Fe^2O^3	1,1 »		Fe^2O^3	8,3 »	
MgO	0,2 »		CaO	1,4 »	
CaO	53,0 »		MgO	2,4 »	
CO^2	41,8 »		SO^3	1,6 »	
	100,0 %		Alcalis	3,3 »	
			Perte	10,1 »	
				100,1 %	

En appliquant la formule ci-dessus, nous aurons :

c^1 = 53,0 = chaux dans la pierre à chaux,
s^1 = 5,0 = silicates dans la pierre à chaux,
c^2 = 1,4 = chaux dans l'argile,
s^2 = 81,2 = silicates dans l'argile,
x = 2,0 = module hydraulique donné,

$$\frac{\text{chaux } 2 \times 81{,}2 - 1{,}4}{\text{argile } 53 - 2 \times 5} = \frac{161}{43} = \frac{3{,}8}{1},$$

c'est-à-dire 3,8 parties de chaux et 1 partie d'argile donnent un bon mélange des matières indiquées.

Le calcul suivant permet de vérifier le module hydraulique :

	Chaux	Silicates
1 partie d'argile	1,4	81,2
3,8 parties de pierre calcaire	201,4	19,0
	202,8	100,2

Module hydraulique 2,02 : 1.

On peut dès lors prévoir que l'analyse du ciment donnera les résultats suivants :

	SiO_2	Al^2O^3	Fe^2O^3	CaO	MgO	So^3	Alcalis
1 partie d'argile	55,7	17,2	8,3	1,4	2,4	1,6	3,3
8,8 parties de pierre à chaux	9,5	5,3	4,2	201,4	0,8	»	»
Total	65,2	22,5	12,5	202,8	3,2	1,6	3,3

= 311,1 parties.

Les chiffres divisés par 3,111 donnent la teneur centésimale du ciment obtenu :

SiO^2	21,0 %
Al^2O^3	7,2 »
Fe^2O^3	4,0 »
CaO	65,2 »
MgO	1,0 »
SO^3	0,5 »
Alcalis	1,0 »

$$\text{Module hydraulique} = \frac{65,2}{32,2} = 2,02.$$

On n'a pas tenu compte dans l'exemple ci-dessus de l'influence des cendres de la combustion qui, suivant la nature et la quantité de combustible, modifient plus ou moins la composition du produit. Comme ces cendres sont généralement plus riches en silicates que le ciment, la proportion de ces derniers en sera augmentée et dépassera dès lors celle trouvée par le calcul.

Lorsqu'on se trouve dans la nécessité d'employer du charbon riche en cendres, on devra en tenir compte dans le calcul du mélange.

R. Meade estime qu'en appliquant la formule de Michaelis on obtiendra dans certains cas des ciments pauvres en chaux, riches en silice et par conséquent à prise rapide; elle ne lui paraît donc pas applicable dans tous les cas qui peuvent se présenter. Sur

quatre ciments de provenance différente et analysés par cet auteur, les rapports étaient A 1,92; B 2,01; C 2,07 et D 2,18. Un ciment fabriqué d'après cette formule dans l'usine D eût été à prise rapide. Si l'on tient compte du mélange des cendres du combustible avec ce ciment, on arrive à cette conclusion que le ciment A est le seul des quatre où le rapport entre la chaux et les silicates avant la cuisson est de 2.



L'indice établi par Vicat fournit des résultats presque identiques à ceux du module de Michaelis; on l'obtient par l'équation suivante :

$$\frac{100 \times (SiO^2 + Al^2O^3)}{CaO + MgO} = 1.$$

Cette valeur varie entre 42 et 48 dans les ciments français du commerce, alors que les conditions de livraison prescrites par le gouvernement stipulent 1 = au moins 44. M se rapproche beaucoup de $\frac{100}{1}$.

Comme on le voit, Vicat tient compte de la teneur en magnésie de la matière première, ce que Michaelis ne fait pas. Il est hors de doute que la méthode de ce dernier est plus exacte, car les recherches d'Erdmenger ont démontré que la magnésie ne peut remplacer la chaux, et qu'elle ne peut, par exemple, augmenter la solidité d'un ciment pauvre en chaux, ni reculer sa limite de solidification, ni ralentir cette dernière, ce que ferait incontestablement une nouvelle addition de chaux. D'un autre côté, le module de Michaelis et l'indice de Vicat ont le défaut d'être basés l'un et l'autre sur l'acception d'ailleurs inexacte de Newberry, que la silice et l'alumine (et en outre l'oxyde de fer chez Michaelis) ont une égale tendance à se combiner avec la chaux, sans considérer si la silice est en proportion importante par rapport à l'alumine ou inversement. Mais Le Chatelier a montré que la silice peut combiner 2,5 fois plus de chaux que l'alumine, c'est-à-dire qu'un ciment fabriqué avec des matières riches en silice peut supporter plus de chaux (2,8) qu'un ciment riche en alumine (1,1).

* * *

Comme la formule du silicate tricalcique $SiO^2, 3CaO$ correspond à 2,8 parties pondérales de chaux contre une partie de sili-

ce, et la formule de l'aluminate bicalcique Al^2O^32CaO à 1,1 partie de chaux contre 1 d'alumine, Newberry en déduit la formule suivante indiquant le maximum de chaux qu'on peut faire entrer dans un ciment Portland de composition correcte :

$$CaO = 2{,}8\ SiO^2 + 1{,}1\ Al^2O^3$$

Ensuite il prend 1 au lieu de 1,1, ce qui paraît pratiquement admissible — et il obtient alors :

$$\frac{CaO - Al^2O^3}{SiO^2} = 2{,}8,$$

qu'il désigne sous le nom de chaux-limite. Comme limite fixée par l'expérience, il établit le nombre 2,6 au-dessous duquel on ne devrait pas descendre, et comme valeur moyenne le nombre 2,7.

Le nombre auquel on doit s'en tenir dans la pratique dépend d'un grand nombre de circonstances. Si, par exemple, le mélange de matières premières ne contient que 2,5 fois plus de silice que d'alumine et d'oxyde de fer, il faut élever autant que possible la teneur en chaux afin d'éviter la prise trop rapide du ciment; on pourrait atteindre ce résultat avec le facteur 2,7 ou même avec un facteur plus élevé. Si, au contraire, le mélange est riche en silice, si cette dernière est trois fois plus importante que l'alumine et l'oxyde de fer, il suffit d'appliquer le facteur 2,6 ce qui permet de réaliser une importante économie de combustible.

Une marne calcaire contient par exemple 17,2 % de SiO^2, 51 % de Al^2O^3 et 40 % de CaO, et la pierre calcaire à mettre en œuvre avec elle : 2,3 % de SiO^2, 0,5 % de Al^2O^3 et 53,8 % de CaO. Le calcul s'établit alors comme suit :

Marne :		
17,2 SiO^2 exigent chaux	17,2 × 2,5 = ...	46,44
5,1 Al^2O^3 »	5,1 × 1 = ...	5,10
	Ensemble......	51,54
La marne en contient déjà...........................		40,00
Il faut donc y ajouter chaux........................		11,54
Pierre à chaux :		
2,3 SiO^2 exigent chaux	2,3 × 2,7 = ...	6,21
0,5 Al^2O^3 »	0,5 × 1 = ...	0,50
	Ensemble......	6,71

Chaux contenue dans la pierre à chaux.................	53,80
Donc SiO^2 et Al^2O^3 de la pierre à chaux exigent..........	6,71
Reste disponible..	47,09

100 parties (poids) de marne exigent donc :

$$\frac{100 \times 11,54}{47,09} = 24,5$$ parties pondérales de pierre à chaux.

Les ciments Portland du commerce contiennent généralement moins de chaux que la quantité recommandée par Newberry; le facteur chaux se rapproche le plus souvent de 2,3 et de 2,6. La différence provient de ce que dans la cuisson les clinkers fixent de la cendre, ainsi que le montrent les résultats d'analyse de 4 ciments Portland d'origine américaine (voir le tableau suivant) :

A	Lehig Portland	Cement	C°	
B	Vulcanite	»	»	
C	Sandusky	»	»	Usine Sandusky
D	»	»	»	Usine Syracuse

d'où il résulte que la teneur en SiO^2 et Al^2O^3 augmente dans chaque cas, tandis que la teneur en chaux diminue dans presque tous. Malgré cela, le facteur chaux des ciments A, B, C, D, concorde parfaitement aussi bien dans le mélange de matières premières que dans les clinkers extraits du four. (Voir tableau p. 70).

Dans son usine R. Meade se sert d'une formule dérivée de celle de Newberry, dans laquelle la quantité de chaux employée est de 90 % de la quantité théoriquement nécessaire pour former le silicate tricalcique et l'aluminate dicalcique. Voici cette formule :

Pierre à chaux nécessaire par tonne d'argile =

$$\frac{(A^1 \times 4,5 + B^1 \times 2,7) - C^1}{C^2 - (A^2 \times 4,5 + B^2 \times 2,7)}$$

A^1 = pourcentage SiO^2 dans l'argile,
B^1 = » Al^2O^3 dans l'argile,
C^1 = » $CaCO^3$ dans l'argile,
A^2 = » SiO^2 dans la pierre à chaux ou la marne,
B^2 = » Al^2O^3 dans la pierre à chaux ou la marne,
C^2 = » $CaCO^3$ dans la pierre à chaux ou la marne.

Désignation	1. Mélange brut				2. Composition calculée des Clinkers				3. Composition trouvée pour les Clinkers				4. Différence entre les séries 2 et 3			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
SiO^2	14,75	13,46	13,25	13,53	22,49	20,50	21,56	22,48	22,95	21,48	22,31	23,62	+0,46	+0,98	+0,75	+1,14
Al^2O^3	3,97	5,33	2,56	2,56	6,12	8,11	5,91	4,25	6,48	8 82	6,21	4,94	+0,36	+0,71	+0,30	+0,69
Fe^2O^3	1,41	1,69	1,69	1,69	2,15	2,57	2,18	2,81	2,59	2,51	2,76	3,49	+0,44	−0,06	+0,58	+0,63
CaO	40,88	41,85	39,15	39,15	63,07	63,73	63,48	65,03	63,30	63,64	63,94	63,95	+0,23	−0,09	−0,46	−1,08
MgO	2,47	1,94	2,13	2,13	3,81	2,95	3,78	3,51	3,72	2,67	3 85	3,32	−0,09	−0,28	−0,07	−0,22
SO^3	0,27	0,31	0,24	0,24	0,42	0,47	1,79	0,40	0,41	0,25	0,53	0,39	−0,09	−0,22	−1,26	−0,01
K^2O	0,95	0,90	0,63	0,63	1,47	1,37	1,01	1,04	0,40	0,45	0,30	0,20	−1,07	−0,92	−0,71	−0,84
Na^2O	0,30	0,20	0,27	0,27	0,47	0,30	0,29	0,45	0,15	0,18	0,10	0,09	−0,32	−0,12	−0,19	−0,36
Perte à la calcination	35,37	34,50	40,22	40,22	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Totaux	100,10	100,18	100,58	100,42	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	»	»	»	»
$\frac{CaO - Al^2O^3}{SiO^2}$	2,60	2,71	2,67	2,70	»	»	»	»	2,52	2,53	2,58	2,50	»	»	»	»

Les mélanges préparés d'après cette formule, s'ils sont cuits convenablement, donneront des ciments ni trop riches ni trop pauvres en chaux, présentant une bonne résistance et donnant toute satisfaction aux différentes épreuves.

Cette formule générale est applicable dans tous les cas qui se présentent et quelle que soit la nature des matières premières.

SUR LA CORRECTION A APPORTER AU MÉLANGE DES MATIÈRES PREMIÈRES POUR LA FABRICATION DU CIMENT PORTLAND

Daprès ce qui précède, pour obtenir un ciment de bonne qualité, on devra donc régler sa composition de manière que les facteurs hydraulisants se rapprochent autant que possible de la moyenne : SiO^2 = 22 à 23 %, Al^2O^3 = 6 à 7 %, Fe^2O^3 = 2 à 3 %. Plus on se rapprochera de ces proportions, meilleur séra le ciment. La teneur moyenne en chaux est de 57 à 66 %. Si les matières premières n'ont pas la composition voulue, il est facile de les corriger par des additions appropriées. La correction la plus fréquente est celle du facteur chaux; elle ne présente d'ailleurs aucune difficulté. Le Dr Kühle (1) cite quelques exemples de corrections typiques, entre autres celui qui s'est présenté dans une fabrique de ciment située dans les Balkans : la matière mise en œuvre était une marne composée de 20 parties de SiO^2 et de 4 parties de sesquioxydes, mais à teneur normale en chaux ; on se trouvait donc en présence d'un mélange très riche en silice. Or, la silice en excès influe défavorablement sur la nature du clinker, qui est peu consistant et s'effrite. Pour y remédier, il était nécessaire d'ajouter au mélange une matière pauvre en SiO^2 et riche en sesquioxydes ; on atteignit parfaitement ce but par une addition de minerai de fer à 68 % de Fe^2O^3. En augmentant la teneur en Fe^2O^3 par rapport à Al^2O^3 on obtint un ciment d'une grande invariabilité de volume en présence d'acide sulfurique. Sa résistance à la compression fut de 468 kg par cm^2. Ces sortes de ciments riches en fer et pauvres en alumine, eu égard à leur invariabilité de volume, conviennent tout spécialement pour les constructions à la mer.

Dans un autre cas cité par l'auteur, les matières premières se composaient de pierre à chaux à 85-90 % de $CaCO^3$ et d'argile

(1) Dr Kühle, *Chem. Ztg*, 1911, p. 255.

très pauvre en SiO^2. Elles devaient donc fournir un ciment très pauvre en silice et riche en alumine. Mais un ciment de ce genre présente des inconvénients : il est à prise trop rapide, il ne se durcit que faiblement après la prise et a une tendance à l'efflorescence. Le meilleur moyen qu'on eut trouvé pour supprimer ces défauts fut d'ajouter du sable au mélange de matières premières. Sans cette addition, la résistance à la compression n'était que de 246 kg, après l'addition de sable elle s'éleva à 344 kg ; après durcissement combiné (28 jours) sans sable, elle était de 398 kg, après addition de sable elle atteignit 408 kg ; au bout d'un an elle était de 324 kg sans sable, et de 538 kg avec sable. Ces chiffres, on le voit, accusent une augmentation considérable de la résistance.

Dans un troisième cas, on réussit à obtenir un ciment normal avec une pierre à chaux pauvre en SiO^2 et des scories à moins de 1 % de fer, par une addition de grès et de minerai de fer. On augmenta considérablement la résistance de ce ciment par une addition de 30 parties de laitier granulé sur 70 parties de ciment, ce qui montre clairement l'influence du laitier sur la résistance.

Les exemples que nous venons de citer se rapportent exclusivement au procédé sec. Dans le procédé humide on procède d'une manière analogue.

CHAPITRE IV

PROCÉDÉS DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND

Quand il s'agit de créer une fabrique de ciment, la première chose à faire est d'étudier la composition exacte des matières premières dont on dispose. Lorsque les résultats de cette étude sont conformes aux conditions exigées, on détermine la méthode de fabrication et on choisit les machines qui conviennent le mieux pour le cas spécial où l'on se trouve. Le choix de la méthode de fabrication à adopter est le plus souvent dicté par les circonstances : la nature et la qualité des matières premières, les conditions de sol et de climat, la qualité et l'uniformité du produit qu'on veut obtenir, l'économie à réaliser dans les frais de production, etc., sont autant de facteurs qui dicteront à l'industriel la marche à suivre pour obtenir de bons résultats.

L'extraction des matières premières se fait de différentes manières : la pierre calcaire dure exige généralement l'emploi d'explosifs, tandis que la marne tendre peut être obtenue à l'aide d'une drague à godets. Suivant l'importance de l'exploitation et l'éloignement de la carrière, les matières sont convoyées à l'usine à l'aide de wagonnets sur rails, de transporteurs à câble, par traction mécanique ou animale.

On distingue en principe trois méthodes de préparation des matières premières, savoir.

La préparation par voie humide ;

La préparation par voie mixte ou demi-humide ;

La préparation par voie sèche.

PRÉPARATION DES MATIÈRES PAR LE PROCÉDÉ HUMIDE

Ce procédé est le plus ancien ; il permet de diviser très finement les matières premières et d'en préparer des mélanges très

homogènes. Il est employé plus spécialement pour le traitement des matières calcaires molles ou demi-dures, très humides.

Suivant la nature de l'argile, on distingue le délayage épais et le délayage dilué. Si l'argile ne contient que peu de sable, on emploie le délayage épais et on la transforme en boue à 38 % d'eau. Si, au contraire, elle contient du gros sable en forte proportion, il est nécessaire de la délayer dans environ 80-85 % d'eau (délayage dilué). Le sable très fin ne peut être éliminé par lavage, ce qui est d'ailleurs inutile, car il est complètement solubilisé par la cuisson.

Lorsque les matières premières sont chargées de grosses impuretés, il est parfois nécessaire de leur faire subir un délayage préparatoire et un délayage final. Dans le délayage préparatoire on élimine les matières hétérogènes, telles que les pierres de quartz, tandis que dans le délayage final on achève de mettre en suspension dans l'eau la matière grossièrement tamisée.

Les matières, amenées à l'aide de wagonnets, sont déversées directement dans le bassin de délayage; quand elles sont mélangées de grosses pierres, celles-ci sont préalablement concassées à l'aide de broyeurs à mâchoires, de moulins à meules verticales, de moulins cylindriques ou d'autres machines appropriées qui seront décrites plus loin.

Pour délayer les matières molles friables, on se sert d'un bassin circulaire construit en béton, plus rarement en fer, ayant 5 à 7 mètres de diamètre et 2 à 3,5 mètres de profondeur, dans lequel tourne un arbre vertical actionné au moyen d'engrenages coniques par poulie et courroie. Sur cet arbre (figures 8 et 9) est monté un système de bras munis de fortes chaînes auxquelles sont surpendues des herses armées de dents en acier qui agitent énergiquement la matière, tandis que l'eau y arrive sans interruption à la partie supérieure. La pâte sort du délayeur par une série d'ouvertures munies de grilles, tandis que les grosses impuretés, telles que fragments de quartz, gravier, etc., se déposent sur le fond du bassin d'où on les élimine de temps en temps.

Le rendement de l'agitateur à rateau dépend du plus ou moins de facilité de délayage des matières. Un appareil d'un diamètre de 7 m. appliqué au délayage en pâte épaisse de craie molle et

d'argile, suffit pour une production annuelle de 120.000 barils de ciment. Il exige une force de 15 à 20 chevaux.

Pour la mise en œuvre de marne et de pierre à chaux plus denses les délayeurs les plus solidement construits restent inefficaces. On se sert alors d'un broyeur humide à meules.

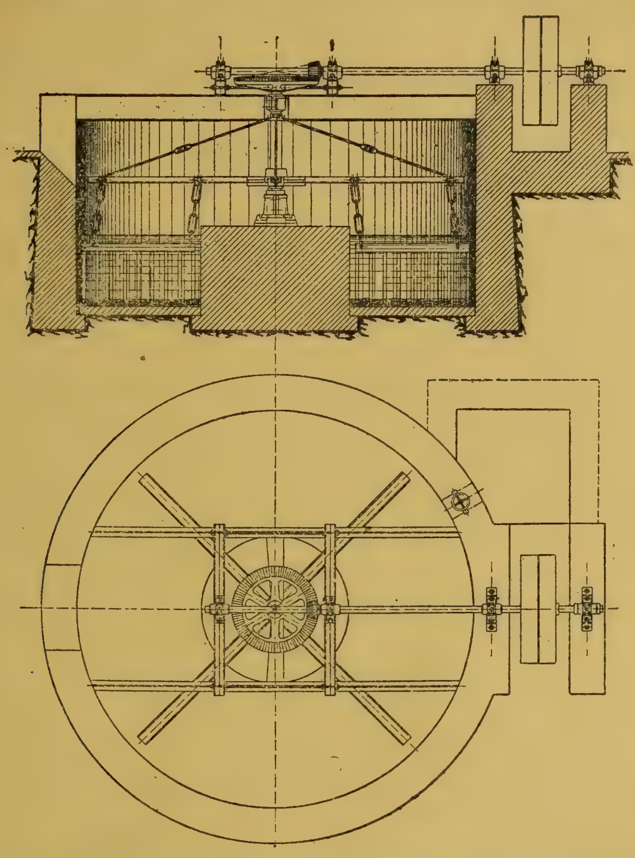


Fig. 8 et 9. — Bassin de délayage pour les matières molles

La boue diluée, obtenue à l'aide des délayeurs ou du broyeur à meules, est élevée au moyen de pompes ou d'élévateurs et déversée dans des bassins de repos creusés dans le sol, dans lesquels elle se dépose et s'épaissit peu à peu par décantation et par évaporation. Ces basssins ont ordinairement 60 m. de long sur 18 à 20 m. de large et 1 m. 50 de profondeur ; leur fond est garni d'une assise de briques posées de champ, et leurs parois

sont en maçonnerie. Le nombre et les dimesions de ces bassins varient d'ailleurs suivant la nature du climat, l'importance de l'usine et d'autres circonstances. On compte en moyenne sur une production de 5 à 8 barils de ciment par mètre carré de surface des bassins.

Le remplissage des bassins de dépôt s'effectue progressivement et par couches successives, c'est-à-dire qu'on attend qu'une première couche soit débarrassée de sa première eau (ce qui est assez rapide), pour y envoyer une seconde couche qu'on laisse déposer pendant un peu de temps, une troisième et ainsi de suite jusqu'à ce que le bassin soit rempli. Comme les matières s'y déposent suivant leurs densités, le dépôt n'est pas très homogène. Mais cet inconvénient ne tire pas à conséquence, vu que lors de l'extraction de la pâte, celle-ci est attaquée par tranches verticales et subit dès lors un malaxage qui a pour effet de parfaire le mélange. La pâte est ramenée par l'évaporation à 40-50 % d'eau; en cet état elle est encore assez fluide pour être chargée dans le four rotatif. Si l'on n'a pas de four rotatif, on la soumet au séchage artificiel pour ramener sa teneur en eau à 18-22 %.

Comme on le voit, le délayage dilué est long et fastidieux; il exige une main-d'œuvre considérable. On a essayé de déshydrater la matière à l'aide de filtres-presses, mais on a dû renoncer à ce procédé. Le moyen le plus économique consiste à faire sécher une partie de la boue jusqu'à une teneur de 10 % d'eau dans un tambour séchoir ou dans un séchoir à canaux, et de mélanger ce produit avec le reste de la boue de manière à la transformer en une masse de consistance suffisante pour être moulée en briquettes. Le séchage de celle-ci, leur cuisson dans les fours d'un des anciens systèmes et le broyage du ciment s'effectuent ensuite de la même manière que dans le procédé sec.

La boue obtenue par délayage dilué contient souvent trop de sable, celui-ci n'ayant pas eu le temps de se déposer dans le délayeur. Pour éliminer ce sable, on fait couler la boue dans des rigoles disposées en labyrinthe, dans lesquelles on ménage des chutes destinées à retenir les grains les plus lourds. Ces rigoles doivent être nettoyées de temps en temps.

On atteint le même but par l'emploi d'un tamis cylindrique représenté par les figures 10 et 11. Ce tamis se compose d'un tambour *s*, entouré d'un tamis fin et muni dans ses parois fron-

tales d'ouverture de sortie a^1 et a^2; il est actionné par la poulie r et les roues dentées z^1 et z^2. Ce tambour, tournant lentement sur son axe, plonge jusqu'à une certaine profondeur dans le liquide qu'il s'agit de filtrer; celui-ci y pénètre en traversant le

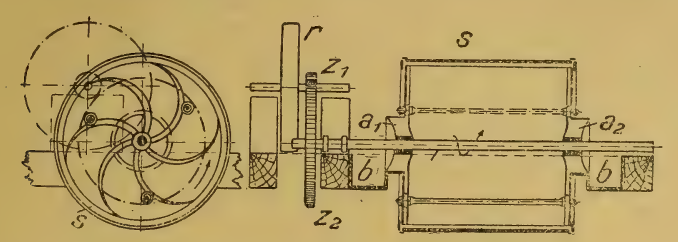


FIG. 10 et 11. — Tamis cylindrique pour éliminer le sable de la boue de délayage

tamis et s'écoule de nouveau par les ouvertures frontales dans les gouttières b, b, tandis que le sable se dépose au fond du récipient dans lequel est disposé le tambour, et en est évacué de temps en temps au moyen d'un régistre.

*
* *

Le procédé de *délayage épais* est beaucoup plus économique que celui du délayage dilué, il est applicable dans tous les cas où la marne et l'argile sont exemptes de gros sable. Il est vrai que la faible addition d'eau dans le délayeur ne permet pas de réduire la boue à la finesse requise dans toutes ses parties : celle-ci, tout en contenant beaucoup de fin est encore trop « grosse » et le mélange des éléments est loin d'être complet. Pour atteindre le degré de finesse nécessaire on dirige la boue du délayeur soit dans le broyeur humide à tube, soit dans le moulin Clarke (le moulin à meules n'est plus employé pour le broyage humide). Ces appareils seront décrits plus loin, ainsi que le tube broyeur sec. Le principe du broyage est le même dans l'un et l'autre cas; la seule différence que présentent les appareils réside dans le mode d'alimentation et de vidange.

Dans ces derniers temps, on remarque chez les constructeurs une tendance générale à simplifier le matériel de broyage. A cet effet, ils ont combiné un tube broyeur permettant d'effectuer en une seule opération le broyage préparatoire et le broyage finissage. Au point de vue pratique, cet appareil présente de réels

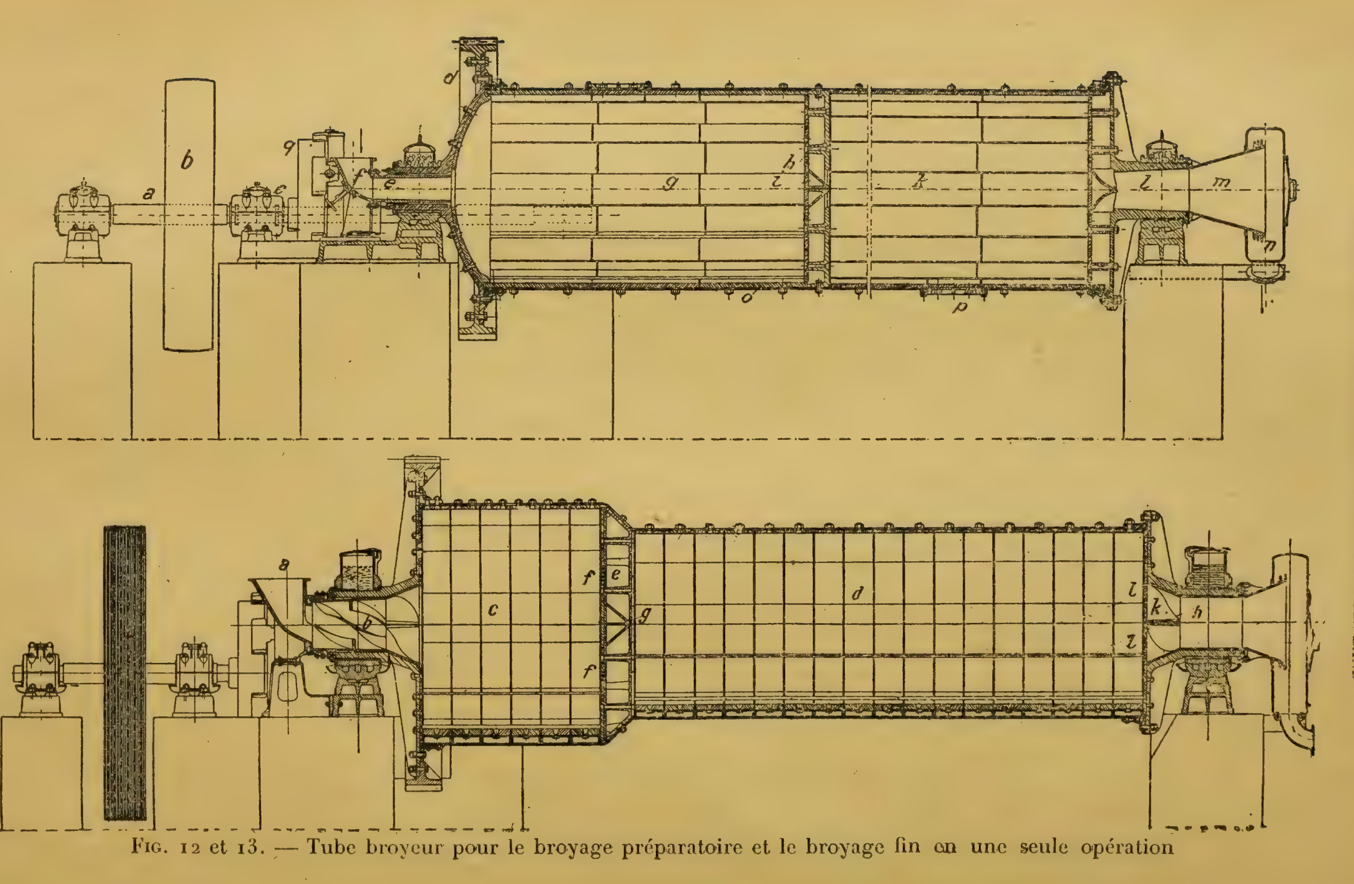


Fig. 12 et 13. — Tube broyeur pour le broyage préparatoire et le broyage fin en une seule opération

avantages, tels que : économie d'emplacement et de construction, de fondations, d'organes de transmission et de frais d'exploitation.

La figure 13 montre la coupe d'un appareil de ce genre. La matière, concassée à la grosseur du poing à l'aide d'un broyeur à mâchoires ou d'un broyeur à cylindres, est chargée dans la trémie *a* de l'appareil, passe par l'axe creux *b* et se rend dans la chambre *c* de broyage préparatoire où elle est réduite à la grosseur d'une noisette; elle passe ensuite par les fentes *f* d'un diaphragme dans la chambre intermédiaire *e*, puis par l'ouverture *g* dans la chambre à broyage fin *d* composée d'un ou de plusieurs compartiments. La matière arrive à l'extrémité droite du broyeur sous forme d'une pâte épaisse très fine; elle sort de la chambre de broyage par des fentes *l* ayant 10 mm. de diamètre pratiquées dans la paroi frontale *k* et quitte l'appareil en passant par le pivot creux *h*, qui se termine par un tronçon de sortie *i*.

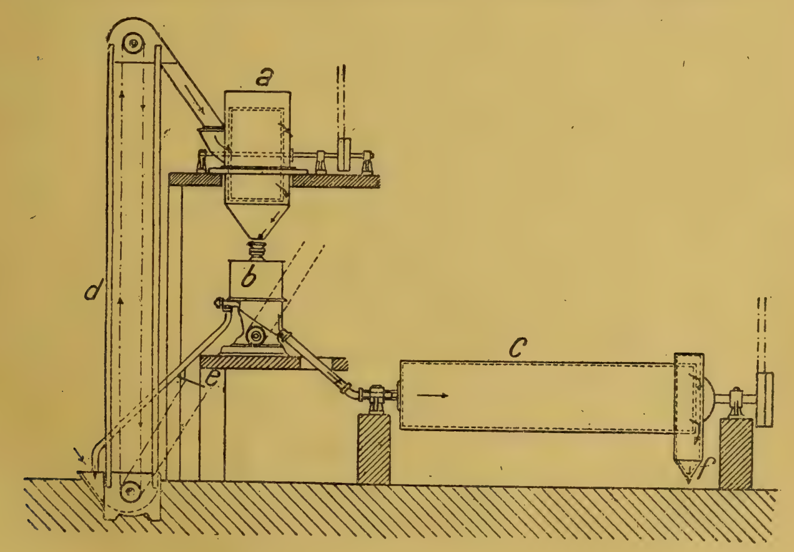


Fig. 14. — Vue de l'installation du Trix entre le broyeur à boulets et le tube broyeur (de Smidth)

Dans cet appareil les corps broyeurs sont des boulets d'acier et des pierres de silex. La paroi intérieure de l'appareil est garnie de plaques de blindage ou de pierres de silex que l'on remplace quand elles sont usées. L'appareil est actionné par cour-

roie ou par câbles au moyen de roues dentées, ou par moteur électrique. Ce broyeur peut être construit pour une production annuelle de 400.000 barils de ciment.

Dans le but de faciliter le travail du tube broyeur, la maison F. L. Smidth intercale entre le broyeur à boulets et le tube broyeur un dispositif qu'elle appelle *Trix*, et qui a pour but de séparer du produit les sablettes et de les faire retourner dans le broyeur à boulets.

Ce dispositif est représenté par la figure 14, où *a* est le broyeur à boulets, *b* le Trix, *c* le tube broyeur, *d* l'élévateur à godets pour élever la matière, *e* le conduit de rétrogradation des sablettes et *f* la sortie de la boue fine.

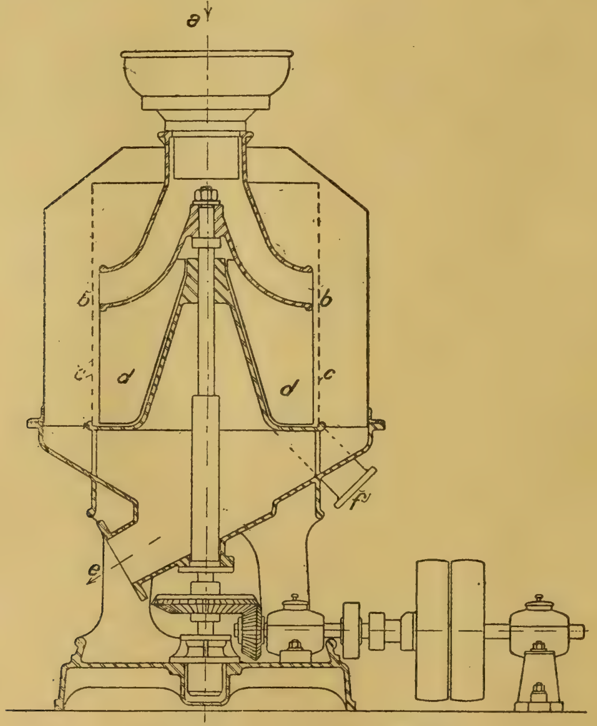


Fig. 15. — Trix, coupe verticale

Le Trix (fig. 15) se compose d'un arbre vertical à rotation rapide muni de palettes recourbées *b* et *d;* la matière, entrant en *a*, est projetée par les palettes *b* vers la périphérie de l'appareil contre un tamis : la matière fine qui traverse le tamis s'écoule

par *e* dans le tube broyeur, tandis que les résidus solides sont charriés par les palettes *d* dans le tuyau *f* qui les fait retourner dans le broyeur à boulets.

La boue épaisse, finement divisée, obtenue avec l'un ou l'autre de ces appareils est ensuite amenée dans des mélangeurs doubles représentés par la figure 16.

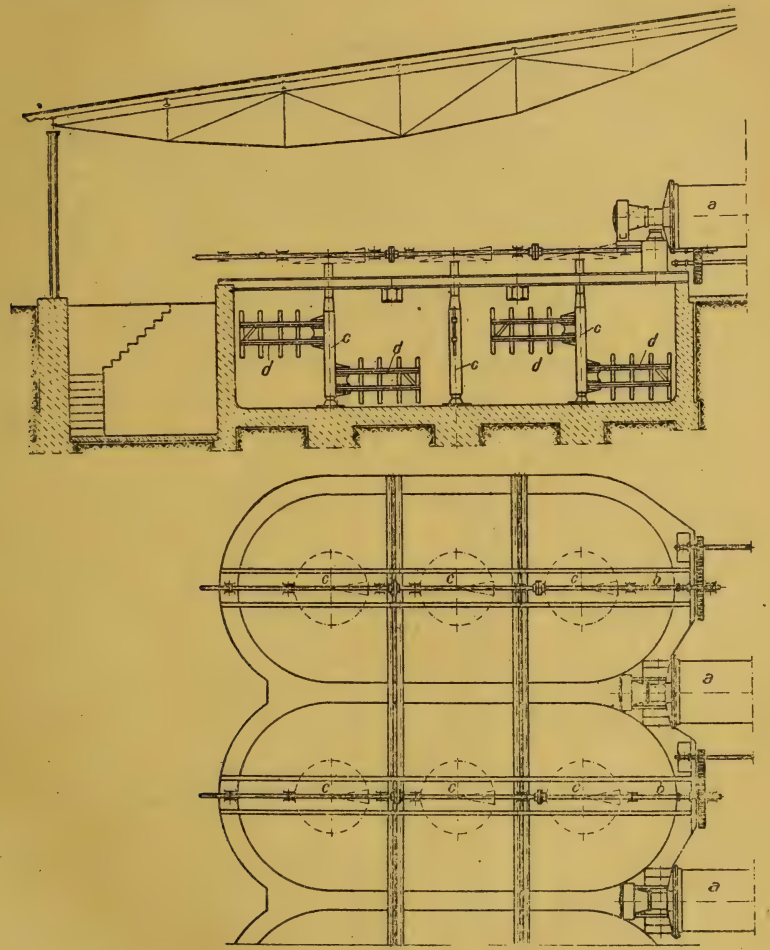


Fig. 16. — Bassin à mélangeurs doubles

Dans un bassin en ciment de forme allongée sont disposés deux ou trois arbres verticaux, munis d'agitateurs actionnés par une poulie commune. Chacun des arbres est maintenu à son extrémité inférieure par une crapaudine et à son extrémité supé-

rieure par un collier. Les agitateurs se composent d'un certain nombre de palettes passant les unes entre les autres et opérant le mélange intime de la boue. Chaque série de mélangeurs est en communication avec la série voisine de manière à éviter les débordements du bassin. Au-dessus de celui-ci se trouve une plate-forme supportant les poulies et les roues dentées et donnant accès pour la surveillance.

Les mélangeurs doubles effectuent un travail énorme, car on a intérêt à soumettre au malaxage une grande quantité de matières à la fois; en outre, les bassins où ils fonctionnent servent en même temps de réservoirs d'attente. Ces bassins ont souvent une contenance de 100 à 150 m³; les agitateurs exigent une force de 8 à 10 chx.

La boue épaisse ainsi préparée est ensuite réduite en briquettes après avoir été additionnée d'une quantité convenable de matière première séchée et broyée à part, ou pompée directement dans les fours rotatifs là où ils existent, et soumise à la cuisson.

Bien que les mélangeurs doubles que nous venons de décrire donnent toute satisfaction, ils présentent le grave inconvénient d'absorber beaucoup de force motrice, car pour atteindre leur but ils doivent fonctionner sans interruption. En outre, ils occupent un grand emplacement, ce qui est également à considérer. Pour remédier à ces inconvénients, on a eu l'idée d'appliquer dans les fabriques de ciment le dispositif à l'air comprimé dont on se sert dans les mines d'or du Transvaal pour maintenir les boues en mouvement. Ajoutons que les tentatives qui ont été faites dans cette voie ont pleinement réussi.

La figure 17 donne une vue d'ensemble de l'installation adoptée pour l'agitation de la boue épaisse au moyen de l'air comprimé. Cette installation se compose d'un réservoir de forme analogue à celle d'un silo, dans lequel la boue est élevée au moyen d'une pompe, et dont la partie conique est munie d'un certain nombre de buses qui sont reliés avec un compresseur par un tuyau commun. Chaque buse est munie d'une fermeture spéciale et disposée de manière à éviter le refoulement de la boue quand on intercepte la pression d'air. Dès que le compresseur fonctionne, la boue se met à bouillonner au point qu'il suffit parfois de maintenir l'agitation pendant $\frac{1}{2}$ heure pour conserver à la masse son homogénéité pendant toute une journée. Il est

clair toutefois que la fréquence de l'agitation dépend de la nature de la matière et de sa capacité d'absorption d'eau. Il y a des boues qui, même après un repos de plusieurs jours, peuvent être facilement remises en suspension, tandis que d'autres exigent quatre ou cinq agitations par jour.

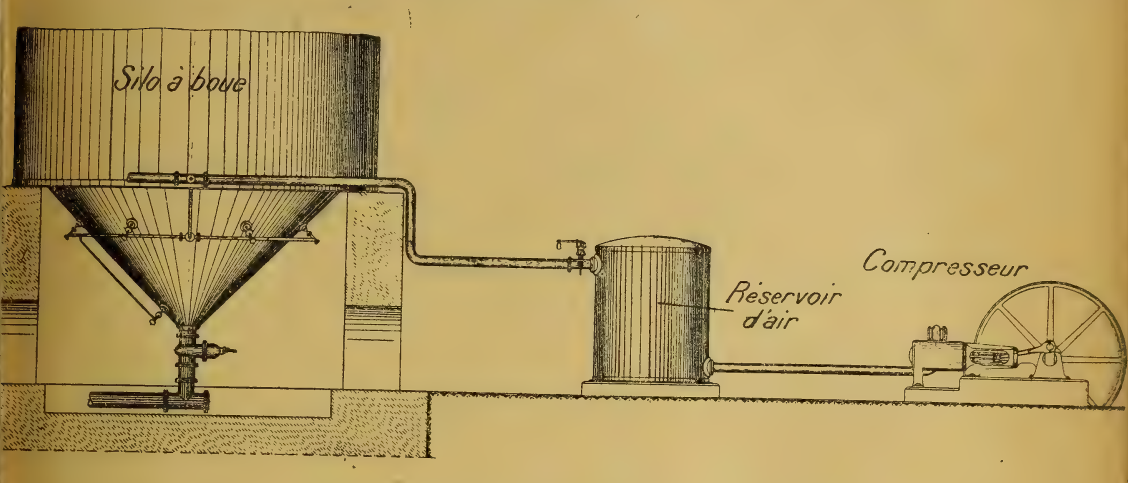


Fig. 17. — Vue de l'installation pour l'agitation de la boue par l'air comprimé

La boue bien mélangée s'écoule vers une deuxième pompe qui l'envoie dans le réservoir placé au-dessus du four rotatif.

Les silos à boue sont des réservoirs en fer ayant environ 6,5 m. de diamètre et 12 m. de haut; leur capacité utile est de 400 m³ de boue correspondant à environ 1.600 barils de ciment. Pour une production annuelle de 300.000 barils (5.000 wagons) on compte quatre réservoirs de ce genre, en tenant compte de la réserve nécessaire.

Entre le compresseur et le tuyau qui le relie aux buses, on intercale un réservoir d'air comprimé, muni d'un manomètre et d'une soupape de sûreté. L'expérience montre que pour mélanger une colonne de boue de 12 m. de haut, il suffit d'une pression de 2 atm ; le compresseur exige dès lors une force de 30 chx.

Le système d'agitation par l'air comprimé présente donc de réels avantages. Les mélangeurs, en effet, doivent être actionnés d'une manière ininterrompue et exigent une force de 15 chevaux, tandis que le compresseur n'a besoin de fonctionner qu'une

ou plusieurs fois par jour pendant très peu de temps. Celui-ci permet donc de réaliser une grande économie de force, en même temps d'accumuler une grande quantité de boue facile à maintenir en suspension. Enfin, ce système n'exige que peu d'entretien et est beaucoup plus propre que celui des agitateurs. Ajoutons que ce procédé fonctionne déjà dans plusieurs fabriques de ciment en France.

Moulin Clarke. — On a introduit dans la fabrication du ciment une machine qui paraît être de nature à remplacer le tube broyeur humide dans nombre de cas, car elle lui est supérieure au point de vue du rendement et de la faible dépense de force motrice. C'est le moulin Clarke (fig. 18). L'inventeur est parti de ce principe que dans le procédé de délayage épais, le produit fourni par les délayeurs constitue en grande partie une boue finement divisée qu'on pourrait charger dans les fours sans plus en la débarras-

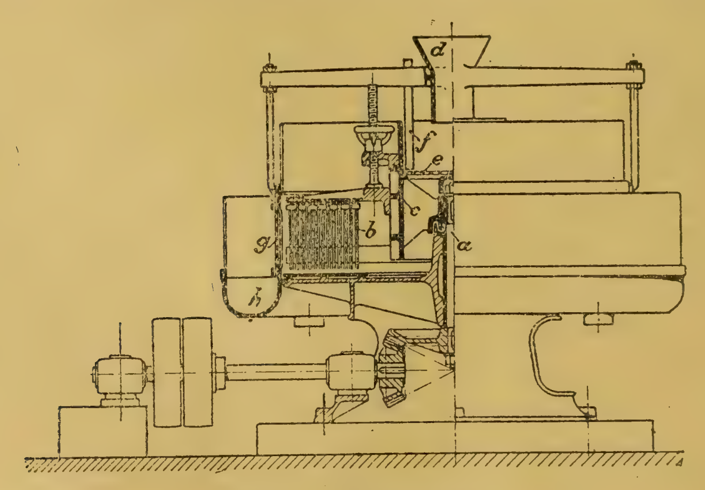


Fig. 18. — Moulin Clarke

sant des gros fragments qu'elle contient. Ces derniers ne consistent pas uniquement en quartz et autres éléments difficiles à broyer, mais encore en grumeaux de chaux ou de craie et d'argile dont le broyage fin n'entraîne qu'une faible dépense de force motrice. Or, tandis que le tube broyeur reçoit toute la boue fine et grosse venant des délayeurs pour la diviser, le moulin de Clarke sépare la boue fine et les grumeaux des grosses impure-

tés, divise les premiers jusqu'à la finesse voulue et élimine les dernières.

Ce broyeur est de construction très simple. Un arbre vertical, mû par poulie et engrenages, fait tourner rapidement un jeu de brosses métalliques fixées sur les bras d'un agitateur La boue qu'il s'agit de broyer est versée dans l'appareil par une trémie formant tamis qui retient les grosses impuretés et les empêche de pénétrer dans l'appareil. Les jeux de brosses sont disposés de manière à écraser les petits grumeaux de craie et d'argile et à prévenir l'obstruction des ouvertures. La rapide allure de l'agitateur a pour effet de projeter la boue contre la paroi perforée de l'enveloppe intérieure : dans ce mouvement, la boue subit l'action des brosses, et passe finalement à travers les ouvertures du tambour pour se rendre dans un canal qui la conduit dans les bassins mélangeurs, d'où elle est envoyée dans les fours. Les fines impuretés dures qui n'ont pas été retenues par le tamis de la trémie sont ramenées dans les bassins délayeurs par une ouverture munie d'un régistre.

Le rendement du moulin Clarke fonctionnant dans une fabrique de ciment anglaise est en moyenne de 24.000 kg de matière sèche à l'heure, avec une dépense de force motrice de 6 chevaux. La boue traitée dans ce moulin provenait d'une craie excessivement souillée de quartz et d'argile de composition normale. Le résidu de la boue amenée dans le moulin était de 12 %, celui de la boue quittant le moulin était de 7 % sur tamis à 5.000 mailles. Le résidu de la boue contenant les fragments de quartz qui avaient pénétré dans le moulin et ramené dans les bassins délayeurs, s'élevait en moyenne à 15 % sur 5.000 mailles et ne contenait que 55,5 % de carbonate de chaux.

Machines élévatoires pour les boues

Dans l'installation du procédé de délayage épais, les machines élévatoires constituent des éléments importants pour le transport de la boue dans une direction verticale, inclinée ou horizontale. Pour le transport sur l'horizontale on se sert beaucoup de vis tournant dans des canivaux en fer. Le transport sur plan vertical ou incliné présente des difficultés qu'on surmonte aisément à l'aide des machines que nous allons décrire.

Polysius se sert d'une pompe à chapelet. Celle-ci se compose

d'une chaîne sans fin munie de distance en distance de petits disques qui constituent les organes élévatoires proprement dits. La chaîne se meut sur une poulie supérieure enfermée dans une gaîne et sur une poulie inférieure qui trempe dans le bassin à boue; elle est guidée dans des tuyaux qui communiquent ensemble au moyen d'une boîte; celle-ci contient en même temps un dispositif de réglage de tension de la poulie inférieure. Cette pompe très rustique, est d'un fonctionnement sûr.

La maison Amme construit une pompe à boue épaisse à quatre pistons à simple effet, montés sur un arbre commun à quatre coudes; elle fonctionne à l'instar d'une pompe à double effet de construction usuelle et refoule la boue en un jet ininterrompu dans la conduite. Chaque piston peut être mis hors de service sans arrêter le fonctionnement des autres. Cette disposition et le mode de construction des soupapes donnent à cette pompe une grande sûreté de fonctionnement et permettent de réduire la teneur en eau de la boue à un strict minimum.

Pour le transport des boues on emploie également le système Mammouth. Le procédé consiste à faire le vide dans une chaudière communiquant avec le réservoir à boue par une tuyauterie. Sous l'influence du vide, la boue remplit la chaudière, d'où elle est refoulée ensuite au moyen de l'air comprimé dans une tuyauterie qui la conduit au point voulu pour son utilisation.

Un autre procédé basé sur le même principe, mais plus perfectionné dans les détails, est représenté par le schema de la figure 19. Il consiste à diriger la boue sortant du tube broyeur soit dans les réservoirs et de ceux-ci dans le four rotatif au moyen de deux vases a^1 et a^2, suspendus à jeu libre à un bras de levier, et mis alternativement en communication au moyen d'un appareil de réglage b, avec les conduites d'aspiration et de refoulement c^1 et c^2. Le vase communiquant avec la conduite d'aspiration se remplit de boue en e^1 ou e^2 sous l'influence de la pression atmosphérique; quand il atteint un certain degré de remplissage, qu'on règle au moyen du contrepoids d^1 et d^2, il descend et actionne l'appareil de réglage, qui le met ainsi en communication avec la conduite d'air comprimé, tandis que le vase resté vide est mis en communication avec la conduite d'aspiration. Sous l'influence de la pression, la boue contenue dans le vase est refoulée dans la conduite e^1 (ou e^2 suivant le cas) et envoyée sur

son point d'utilisation; en même temps le second vase se remplit de boue et actionne à son tour l'appareil de réglage, et ainsi de suite.

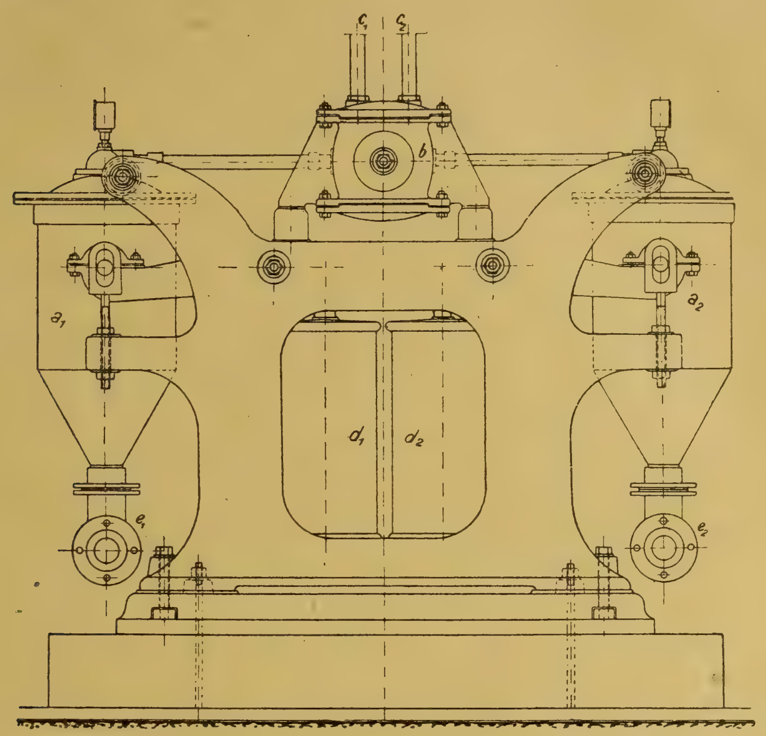


Fig. 19. — Vue des réservoirs pour le transport de la boue par l'air comprimé

Le système fonctionne avec une alternance continue, de sorte qu'il n'y a aucun arrêt dans le transport de la boue.

Ce procédé présente de grands avantages : il ne comporte pas d'organes en mouvement, tels que flotteurs, clapets, etc. ; il n'exige ni graissage, ni surveillance spéciale. Il peut être construit pour n'importe quel rendement; enfin, il peut être actionné et mis en arrêt d'un point quelconque de l'usine.

PROCÉDÉ MIXTE OU DEMI-HUMIDE

Entre le procédé humide que nous venons d'esquisser, et le procédé sec qui va être décrit plus loin, se place le procédé mixte ou demi-humide. Il consiste à ne délayer qu'une partie des ma-

tières premières, qui est ordinairement l'argile, afin d'en éliminer le sable qui s'y trouve mélangé. La pâte d'argile est ensuite mélangée à la pierre calcaire broyée sèche pour l'humecter; ce mode de procéder ne présente généralement pas de difficultés, vu que l'argile ne forme que 20 à 25 % de la masse totale, de sorte qu'elle n'apporte avec elle qu'une faible quantité d'eau, mais suffisante pour permettre de transformer la matière en briques tout comme dans le procédé humide. Par contre, les briques ainsi obtenues se distinguent par une plus grande solidité et résistent mieux aux manipulations du séchage.

Le procédé de la pâte épaisse a été l'objet d'une communication de W. Haberland à l'assemblée générale des fabricants de Portland allemands en 1905. Depuis cette époque, ce procédé a été appliqué par différents constructeurs et amené à un haut degré de perfectionnement.

Faut-il employer le procédé humide ou le procédé sec ?

Cette question a donné lieu à des discussions entre spécialistes et nous n'avons pas la prétention de la trancher. Qu'il nous suffise de reproduire les observations qu'elle a suscitées et qui ont été publiées par une revue spéciale (1).

Voici tout d'abord l'avis du Dr Calonne.

« Le perfectionnement incessant des machines employées dans l'industrie du ciment a permis d'améliorer la préparation des matières premières de telle sorte que la fabrication du ciment de bonne qualité ne présente plus aucune difficulté, si l'on a soin de doser convenablement le mélange des matières employées. Par suite aussi, le choix de la méthode de fabrication a été beaucoup simplifiée ; mais, en l'état actuel de la concurrence, les fautes commises dans l'installation d'une usine n'en sont que plus difficiles à réparer. Il n'existe pas de schema tout fait qui puisse servir pour l'installation d'une fabrique de ciment, car chaque usine doit être adaptée aux circonstances locales. Dans l'étude de toute installation nouvelle on aura souvent à résoudre la question de savoir si c'est le procédé humide ou le procédé sec qui doit têre appliqué. L'un et l'autre procédés ont été parfaitement mis au point, ils permettent également de fabriquer du ciment de bonne qualité avec des matières premières réellement utilisables.

« Plus que tout autre praticien, dit l'auteur, j'ai eu l'occasion de suivre le développement du four rotatif pour le procédé humide aussi bien que pour le procédé sec... J'ai tout d'abord étudié le procédé humide (boue

(1) *Tonindustrie Zeitung.*

épaisse) dans une usine qui employait comme matières premières de la craie humide et de l'argile. Dans ce cas spécial le procédé humide s'imposait. L'argile ne contenait que très peu de sable excessivement fin ; la craie était très pure, on y trouvait parfois des pierres de silex. Ces matières étaient mises en œuvres avec leur humidité naturelle d'environ 20 %, et délayées ensemble dans un bassin. La boue épaisse ainsi obtenue était broyée dans des moulins à meules horiontales à meule tournante inférieure, et écoulée de là dans des réservoirs d'attente, où l'on corrigeait les faibles inégalités de composition. Dès le début, cette installation comportait des fours rotatifs ; elle était très simple et facile à surveiller. Bien que cette usine existe déjà depuis un certain nombre d'années, elle peut être considérée encore aujourd'hui comme une usine modèle. Je ne connais pas d'autre usine qui ait une aussi faible dépense de force motrice par baril de ciment, ce que j'attribue à ce fait que le broyeur à clinker est combiné avec un séparateur à air.

« La situation est bien différente dans une autre usine qui travaille également avec le procédé humide (boue épaisse). Cette usine met en œuvre des pierres à chaux du jurassique, d'une teneur de 78 à 80 % de carbonate de chaux et d'une teneur très faible en humidité naturelle (env. 2 % le plus souvent). Les pierres étaient concassées dans un broyeur à mâchoires et la matière était ensuite réduite à la finesse exigée par broyage humide dans des moulins à boulets et des tubes broyeurs. Les variations de la teneur en calcaire du mélange boueux étaient corrigées dans les réservoirs d'attente. Le mélange humide était ensuite soumis à la cuisson dans un four rotatif. Le procédé humide avait été adopté quelques années auparavant parce qu'on avait appréhendé des difficultés par suite du dégagement de la poussière dans le procédé sec, difficultés qui actuellement ne sont plus insurmontables. Mais, en adoptant le procédé humide on a dû se résigner à subir de graves inconvénients dans la préparation des mattières premières et des frais plus élevés dans le fonctionnement du four. Contrairement à ce que l'on prétend souvent, le procédé humide ne fournit pas de meilleur ciment que le procédé sec.

« Comme les pierres pauvres en carbonate de chaux sont beaucoup plus tendres que celles qui sont riches en carbonate, il arrivait que les gros grains de la boue étaient généralement plus riches en carbonate. Or, ces grains se déposaient facilement au fond du réservoir malgré l'action de l'agitateur. Introduit dans le four, ce dépôt a pour effet de diminuer considérablement la qualité du ciment. Dans cette usine, la boue épaisse se déposait beaucoup plus rapidement au fond du réservoir que la craie dans l'usine citée en premier lieu ; c'est là un grave inconvénient qui, indépendamment des irrégularités qu'il produit dans la marche du four lorsque le bassin de délayage cesse de fonctionner, peut facilement amener la rupture des bras de l'agitateur.

« Mais l'erreur capitale qui a été commise dans l'étude du projet de cette usine réside dans l'augmentation des frais de cuisson des boues. D'après mon expérience personnelle, le procédé humide bien conduit entraîne, par rapport au procédé sec, une augmentation de dépense de

5 kg de charbon de qualité moyenne par 100 kg de ciment, soit 500 kg par wagon. En outre, ces 500 kg de charbon doivent être réduits en poudre fine, ce qui en augmente le prix de 10 %.

« Dans le procédé sec, le séchage des matières quand elles ne sont pas trop humides (10 à 15 % d'humidité) peut être fait sans augmentation de dépenses par les gaz perdus du four, qui sont à une température de 500-700°. On peut invoquer en faveur du procédé humide les frais peu élevés qu'entraîne le broyage sec. Mais, quel rapport y a-t-il entre cette économie insignifiante et l'augmentation de la dépense de combustible pour la cuisson de la boue dans le four rotatif? D'ailleurs, l'économie de force motrice réalisée dans le broyage humide des matières dures est encore diminuée, à mon avis, par ce fait que les broyeurs humides s'usent beaucoup plus vite que les broyeurs secs.

« Dans les premiers débuts du four rotatif, celui-ci était trop court et la dépense de combustible beaucoup plus élevée qu'actuellement pour la cuisson dans le procédé sec ; en outre, les poussières qui se dégageaient par la cheminée présentaient des inconvénients parfois très graves, toutes choses qui plaidaient en faveur du procédé humide. Mais aujourd'hui la plupart des fabricants de ciment considèrent le procédé sec comme le plus avantageux.

« Dans ces dernières années les dimensions du four rotatif ont été considérablement augmentées. Ce fait me paraît être surtout un moyen de surenchère des constructeurs. Il n'est pas un directeur qui ignore les difficultés auxquelles on est exposé quand on travaille avec un four unique. Il suffit que parmi les nombreux engrenages une seule roue vienne à refuser son service pour paralyser toute la fabrication, d'où découlent des difficultés avec la clientèle qui attend les livraisons, et finalement avec les ouvriers. J'estime que les fours de dimensions exagérées — au-delà de 50 m. de long — ne pourront se maintenir ».

Le Dr Hans Kühl a fait la réponse suivante :

« La question posée ne peut pas être résolue d'une manière générale, car il faut tenir compte de tous les facteurs qui se présentent dans chaque cas particulier. Les points à examiner sont les suivants : Le procédé humide peut fournir parfois le moyen d'améliorer la qualité du ciment ; mais ce n'est pas toujours le cas, loin de là. — L'augmentation de la dépense de combustible dépend du fonctionnement du four, de la fusibilité des matières premières, de la finesse du broyage sec et d'une foule d'autres causes, de sorte qu'il est impossible de l'exprimer par des chiffres précis. Cependant, comme l'évaporation de l'eau dans le procédé humide exige la même quantité de chaleur que la fonte de la poudre brute, il est hors de doute que la cuisson à point de la boue épaisse exige beaucoup plus de combustible que celle des matières préparées par le procédé sec. D'après mon expérience personnelle, j'estime à au moins 20 % la différence en plus de combustible nécessaire dans le procédé humide.

« Les causes déterminantes pour l'installation du procédé humide

sont : la suppression du séchage de la matière brute, la facilité d'homogénéiser le mélange des matières premières, la suppression de la poussière dans le travail et l'économie de force motrice. Si toutes ces raisons trouvent en elles-mêmes leur justification, aucune d'elles n'est déterminante, car en fin de compte il importe uniquement de savoir lequel des deux procédés travaille le plus économiquement dans les circonstances où l'on se trouve, et cette question ne peut être résolue que par un homme du métier d'après l'examen attentif de la situation fait sur les lieux mêmes ».

Opinion de K. B., directeur de la fabrique de ciment de X... :

« On ne peut plus prétendre aujourd'hui que le ciment Portland fabriqué d'après le procédé humide soit supérieur à celui qui est obtenu dans le procédé sec. Cette supériorité existait autrefois, lorsque le procédé humide (boue diluée), employé dans les usines qui mettaient en œuvre de la craie, pouvait être opposé au procédé sec à cause de l'imperfection des broyeurs secs. La dépense de combustible en plus pour la cuisson des matières humides est d'environ 5 kg de houille de qualité moyenne par 100 kg de ciment. Le procédé humide ne présente des avantages réels que dans les cas où les matières premières sont très humides, le charbon très bon marché, et qu'il se prête bien aux conditions spéciales où l'on se trouve. Quand on peut avoir de la force hydraulique à bon compte, il ne serait pas sage de chercher à faire des économies de force motrice pour le broyage des matières, pour se voir obligé ensuite à dépenser une quantité de charbon proportionnellement plus grande pour le séchage de la boue dans le four.

« Le procédé humide mérite la préférence dans le cas où l'on met en œuvre des matières molles, naturellement très humides. Dans ces dernières années on a installé le procédé humide dans des fabriques qui mettent en œuvre des matières dures, pierreuses. On peut dire que c'est là une affaire de mode. Car on ne saurait plus soutenir aujourd'hui comme autrefois que le procédé humide permet de mieux mélanger les matières premières et par là même d'influer sur la qualité du ciment ; on ne saurait pas davantage soutenir que le procédé humide exige moins de force motrice. Ce n'est qu'en comparant le rendement des broyeurs humides avec celui des moulins à boulets et des tubes broyeurs de construction ancienne que l'on peut trouver une différence en faveur du procédé humide. Car on a aujourd'hui pour le broyage sec des machines nouvelles qui fournissent un excellent travail et répondent à toutes les exigences au double point de vue de la finesse et de la dépense de force motrice. Transformer une usine pour remplacer le procédé sec par le procédé humide n'est pas une chose à conseiller sans un motif impérieux, car cette transformation exigerait le remplacement de presque tout l'outillage mécanique et entraînerait une dépense presque égale à celle que nécessiterait l'installation d'une usine toute neuve. »

CHAPITRE V

PRÉPARATION DES MATIÈRES PAR VOIE SÈCHE

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

Ce procédé, qui est de beaucoup le plus appliqué, peut être caractérisé comme suit :

Les matières premières amenées de la carrière à l'usine sont d'abord concassées à la grosseur uniforme d'un œuf ou mieux d'une noix. Le concassage de la pierre calcaire s'effectue dans un broyeur à mâchoires ou un broyeur conique; l'argile plastique est déchiquetée à l'aide de broyeurs à cylindres cannelés ou hérissés de pointes; enfin les matières dont la dureté varie entre celle de la marne et celle de la pierre calcaire sont broyées parfois à l'aide de broyeurs cylindriques doubles, très lourds. Le concassage est suivi du séchage, du broyage intermédiaire, du broyage fin et enfin de la cuisson.

Le procédé par voie sèche peut être exécuté de différentes manières. On peut opérer comme dans le procédé humide : peser ensemble la chaux et l'argile en l'état d'humidité naturelle où elles se trouvent, les concasser, les faire sécher et les broyer ensemble. Ce mode de travail est incontestablement le plus simple; il est applicable lorsque la chaux et l'argile doivent être mélangées en proportions élevées. Dans le cas contraire, il y a lieu de craindre que le séchage en commun des deux matières, si différentes au point de vue de leur humidité et de la manière dont elles se comportent sous l'action de la chaleur, n'ait pour effet de les modifier au point d'influer sur l'exactitude du dosage.

Ou bien, on fait sécher séparément la chaux et l'argile et on les conserve en silos, puis on les pèse, ou on les dose à l'aide d'appareils doseurs automatiques, on les mélange et on les broie

ensemble. Cette méthode est un peu plus compliquée que celle ci-dessus, mais on est sûr en travaillant avec soin d'obtenir toujours des dosages exacts.

Enfin, on peut encore faire sécher et broyer séparément la chaux et l'argile, peser ensuite et mélanger en proportions convenables les poudres brutes achevées. Ce procédé est par lui-même excellent, mais il présente l'inconvénient d'augmenter les frais d'installation, car il exige un système spécial de broyage pour chaque matière séparément et des appareils mélangeurs très exacts.

Quel que soit le mode de préparation du mélange, la matière pulvérulente ne peut être soumise en cet état à la cuisson dans les fours anciens, car elle ferait obstacle au passage de l'air nécessaire à la combustion. Il est nécessaire de lui donner la consistance d'une masse plastique en la malaxant avec de l'eau et de faire passer la pâte par une presse à briques pour la transformer en blocs de dimensions normales. Les briques sont ensuite soumises à la dessication, le mieux dans un séchoir à canaux, et enfin à la cuisson. Pour faire cuire la poudre sèche dans le four rotatif, il suffit de l'humecter par addition de quelques centièmes d'eau.

Contrairement à ce qui a lieu pour le procédé par voie humide, qui n'exige que quelques appareils pour la préparation des matières, le procédé par voie sèche impose l'emploi de toute une série de machines et de moyens mécaniques. Nous en donnerons la description en sériant les questions autant que possible suivant l'ordre du travail.

SÉCHAGE DES MATIÈRES PREMIÈRES

Autrefois on effectuait le séchage des matières premières en les plaçant sur des plate-formes sous lesquelles on brûlait du coke ou qu'on chauffait avec les gaz de la combustion provenant des chaudières à vapeur. Ce mode de séchage a complètement disparu des usines, car il entraînait une forte dépense de combustible et de main-d'œuvre.

Dans les usines travaillant par les anciens procédés on emploie souvent encore des fours à coupole pour le séchage; mais ceux-ci ne conviennent que pour les matières en gros morceaux, car

les menus n'auraient pas le tirage nécessaire, malgré l'intervention du soufflage pour activer l'opération.

Un four vertical de ce genre est celui de F. L. Smidth. Les matières y sont chargées par le haut à l'aide d'un élévateur et descendent peu à peu à mesure qu'on les tire par les ouvertures ménagées à cet effet dans la paroi extérieure du four. Les matières vont à la rencontre d'un courant d'air chaud qu'on y injecte au moyen d'un ventilateur et qui constitue un mélange d'air et de gaz de la combustion. L'air sec s'élève dans la chambre centrale du four, qui est semblable à une ruche d'abeille, et sort par les ouvertures ménagées dans la paroi, passe à travers les matières et sort à l'état saturé par la cheminée qui surmonte le four.

Un four de construction analogue est celui de Cummer. Il se distingue en principe de celui de Smidth par la disposition centrale du dégagement des gaz et de la buée.

Ces sortes de fours peuvent être avantageusement employées, là où ils existent, dans certains cas déterminés. Il en est tout autrement des séchoirs modernes à tambour qui sont en quelque sorte universels, car il n'existe aucune matière qui ne puisse y être séchée de la manière la plus rationnelle, c'et-à-dire avec le minimum de combustible, de travail, de temps et d'encombrement. On a réalisé ce progrès : 1° en réduisant les matières au préalable en un certain état de finesse avant de les sécher, vu qu'elles présentent aux gaz de la combustion et à l'air chaud une surface beaucoup plus grande sous un même volume, 2° par l'emploi d'un foyer économique, fumivore et 3° par l'emploi d'un ventilateur puissant qui active la combustion en même temps que l'échange d'air dans l'appareil. Malgré cette ventilation énergique le dégagement de poussières est insignifiant ; on les évacue d'ailleurs à l'aide d'appareils spéciaux, ainsi que nous le verrons dans la suite.

Un des séchoirs les plus employés en France est le séchoir rotatif Devaux, perfectionné par MM. G. Vernon et E. Pouligny. C'est un appareil simple, robuste, économique, moins coûteux que n'importe quel autre système de séchage. La figure 20 indique suffisamment sa construction et son mode de fonctionnement. Il est constitué essentiellement par un tube tournant, muni intérieurement d'un système d'éléments parallèles de forme spé-

ciale qui opère le brassage et l'avancement automatique de la matière soumise au séchage. Il est traversé par un courant de gaz chauds produits dans un foyer situé à l'extrémité droite du tube et appelés à travers celui-ci par un ventilateur qui se trouve à l'autre extrémité. Le foyer est agencé de telle sorte qu'on puisse régler exactement les rentrées d'air et, par suite, la température des gaz chauds suivant la nature des matières à traiter. Celles-ci sont introduites dans le tube au moyen d'une goulotte visible sur la gravure et le quittent à l'extrémité opposée. Les matières fraîches (marne, argile, calcaire, etc.) viennent donc en contact avec les gaz les plus chauds, ce qui est très rationnel, et circulent dans le tube dans le même sens que ces derniers : c'est là la caractéristique de la marche anti-méthodique de l'appareil. Grâce à l'emploi d'un dispositif particulier de chargement, les matières in-

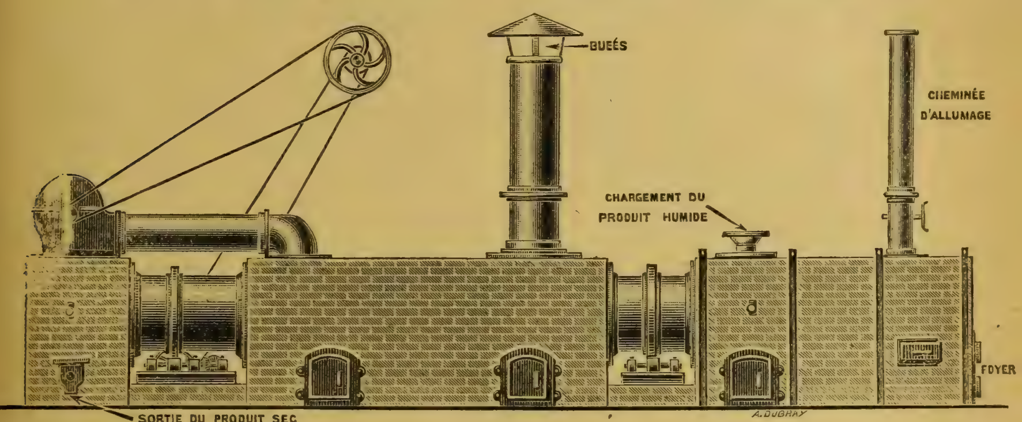


FIG. 20. — Séchoir rotatif Devaux. G. Vernon, constructeur à Vernon (Eure)

troduites se répartissent en couches uniformes sur toutes les parties du tambour ; celui-ci se trouve donc en équilibre parfait, ce qui facilite beaucoup son fonctionnement.

Toutes les parties mobiles du tambour sont d'un accès facile et peuvent être visitées à tout moment en pleine marche. Le service du tambour se réduit au chargement de la grille du foyer.

Le combustible employé est le charbon tout venant.

Comme l'utilisation de la chaleur est parfaite dans cet appareil la dépense de combustible est très faible. Le coefficient de vaporisation est d'autant plus grand que la matière à sécher est plus humide, car on peut alors travailler à des températures

beaucoup plus élevées tout en dépensant relativement moins de calorique pour rechauffer la matière. Pour utiliser la chaleur perdue par cette dernière après l'achèvement du séchage, il est bon de ne pas la déshydrater complètement et de la loger dans des silos de manière à ce que sa chaleur propre serve à vaporiser le reste d'humidité. Ces silos sont construits en pierre et en fer, munis de canaux de circulation de l'air et de cheminées de dégagement de la buée ; leur emplacement derrière le séchoir donne en outre la possibilité de pouvoir traiter alternativement de l'argile et de la chaux dans le même tambour.

LE CONCASSAGE DES MATIÈRES PREMIÈRES

Comme nous l'avons fait observer plus haut, une des conditions essentielles du séchage des matières premières est de les réduire au préalable à un état de finesse suffisante. Comme le degré de finesse du broyage varie suivant chaque cas particulier, il est impossible de lui assigner une limite précise. C'est pourquoi nous nous contenterons de décrire les principales machines employées dans ce but.

Broyeurs à mâchoires. — Cette machine se compose (*fig.* 21 et 22) de deux mâchoires A' et A'' en fonte durcie, dentées ou

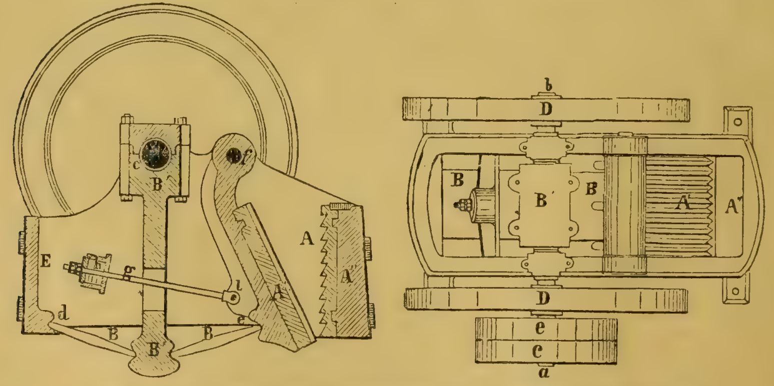


Fig. 21 et 22. — Vue schématique du broyeur à mâchoires

lisses et du mécanisme moteur. L'une des mâchoires A'' est fixée à la paroi antérieure du bâti ; l'autre, A', est mobile et fixée sur un porte-mâchoire qui est animé d'un mouvement d'oscillation autour de son axe *f*. Ce mouvement est transmis par l'arbre de commande à excentrique *c* par l'intermédiaire de la biel-

le d'excentrique B' et d'un levier brisé formé par les deux plaques d'articulation BB s'appliquant, l'une sur le bâ-mobile. Pour éviter les chocs, ce dernier est relié en liaison élastique avec la bielle B' au moyen du ressort g.

Pour chaque révolution de l'arbre c l'intervalle A compris entre la mâchoire fixe et la mâchoire mobile se resserre, et son minimum d'ouverture détermine la grosseur des morceaux concassés. Un dispositif de réglage très simple permet de faire varier l'angle d'ouverture des mâchoires suivant la nature des matières soumises au broyage et le degré de finesse qu'on veut obtenir. Plus la matière est dure, plus l'angle d'ouverture doit

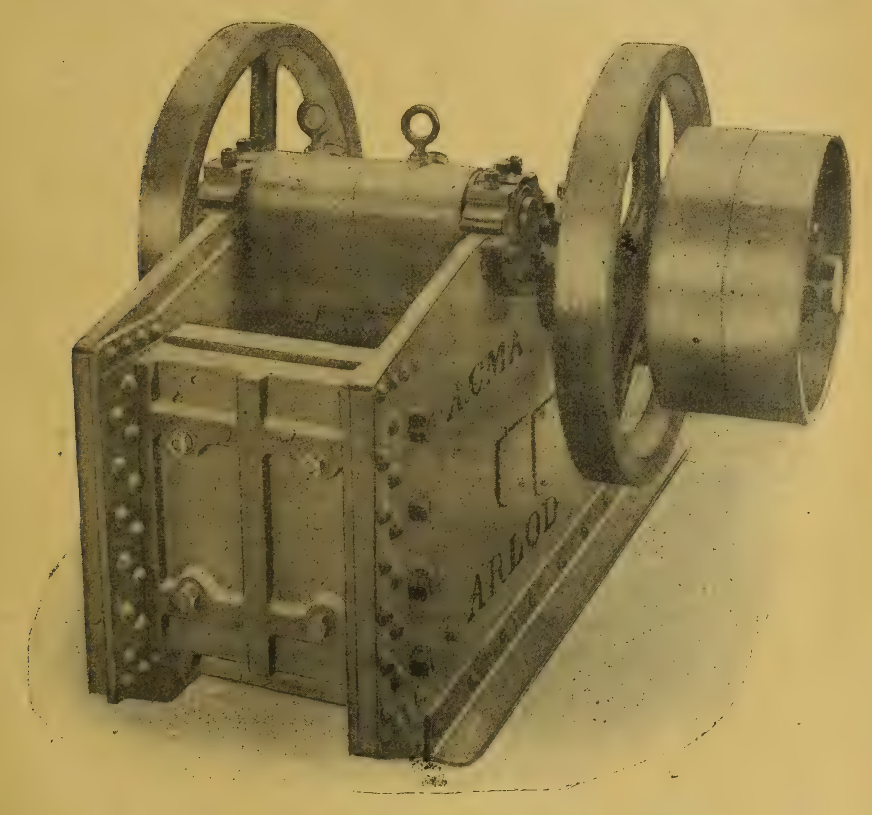


FIG. 23. — Broyeur à mâchoires des Ateliers d'Arlod

être petit, et plus le rendement de l'appareil diminue. La grosseur des morceaux peut varier de 20 à 100 mm. de diamètre avec une proportion de grains qui dépend du degré de friabilité

de la matière. Plus le broyage est fin, moins est élevé le rendement du broyeur, et réciproquement.

Les plaques d'articulation forment pièces de sûreté ; elles permettent d'éviter tout effort brusque qui serait occasionné par le passage d'un corps dur, une masse de fer par exemple, et cèdent alors sans qu'aucune des pièces essentielles de l'appareil ne soit endommagée.

Cette machine est munie de deux volants très puissants qui assurent l'uniformité de marche.

Un broyeur de ce genre peut broyer 15.000 à 18.000 kg à l'heure avec une force d'environ 6 à 25 chevaux.

Le choix des dimensions du broyeur dépend non seulement du rendement qu'on en attend, mais encore de la finesse exigée et de la dureté de la matière soumise au broyage.

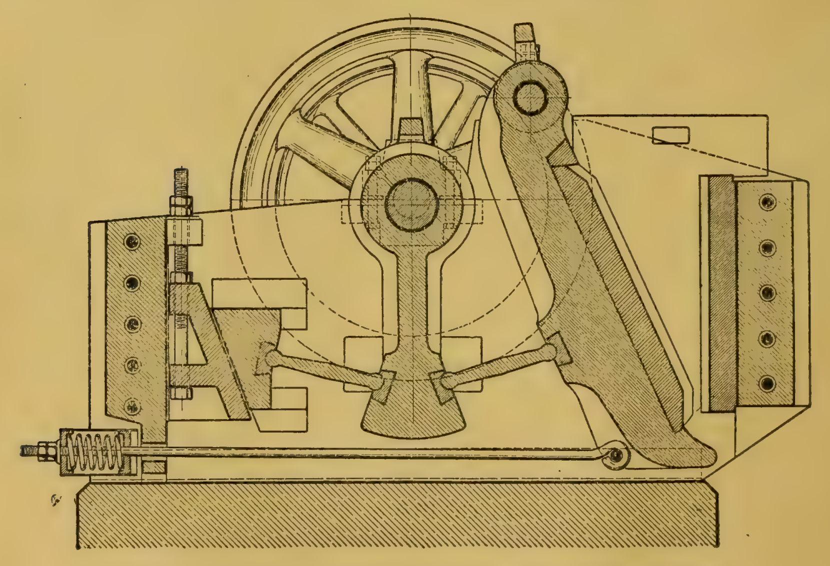


Fig. 24. — Broyeur à mâchoires des Ateliers d'Arlod. Coupe

Les broyeurs à mâchoires sont généralement de construction très robuste. Le bâti est en fonte; dans les grands modèles il est renforcé par des bandages en acier. Dans les cas où les conditions de transport sont mauvaises, on contruit le bâti en fonte d'acier et on lui donne une forme démontable. Les mâchoires doivent être en fonte de coquille de première qualité, leurs parois sont revêtues de plaques interchangeables de même métal.

Un autre genre de broyeur à mâchoires, de construction plus ramassée, est le *granulateur*, qui est d'un emploi très fréquent dans les usines françaises. Il diffère un peu du broyeur que nous venons de décrire, en ce sens qu'il ne comporte pas de levier brisé. La mâchoire mobile est fixée directement sur l'arbre d'excentrique et exécute par conséquent un mouvement particulier de trituration. Ce broyeur donne de très bons résultats lorsque les matières soumises au broyage ne sont pas trop dures. Il est vrai que la mâchoire mobile est sujette à une usure rapide par suite même de son mouvement propre, mais on passe généralement sur cet inconvénient.

Un défaut commun aux broyeurs à mâchoires et aux granulateurs est qu'ils ne travaillent que par chocs répétés et ne produisent d'effet utile que dans un mouvement sur deux. L'énergie employée pour le recul de la mâchoire est dépensée en pure perte; il s'ensuit que le rendement ne dépasse pas 15-18 tonnes par heure.

Broyeur vertical à cône oscillant

Le broyeur à cône oscillant sert, tout comme le broyeur à mâchoires, à broyer les pierres, les scories, etc., quel que soit leur degré de dureté. Toutefois, il est supérieur au concasseur à mâchoires sous plusieurs rapports, notamment quand il s'agit de fortes productions. Tandis en effet que le broyeur à mâchoires ne fournit du travail que dans le mouvement en avant, le broyeur à cône oscillant travaille d'une manière continue. Cette différence fondamentale dans le mode de travail des deux machines présente de réels avantages pour le broyeur conique, qui résident notamment dans un rendement horaire plus grand, et une marche plus silencieuse, exempte de chocs. Comme le broyeur agit sur la matière par torsion et par pression, et comme on n'a pas à dépenser ici de force motrice pour actionner des masses marchant à vide, le fonctionnement de la machine est plus économique et sa dépense de force motrice est plus faible que celle du broyeur à mâchoires de même puissance.

Le broyeur conique se compose en principe de deux organes actifs, à savoir : d'un cône broyeur, cannelé ou non, enfilé sur un arbre oscillant, et d'un anneau de broyage. Le cône broyeur se meut librement autour de son axe, son mouvement de rotation

n'a donc rien de forcé; ce qu'il y a de forcé dans son mouvement est une oscillation circulaire produite par une boîte d'excentrique et un jeu d'engrenages, en vertu de laquelle le cône intérieur se rapproche successivement des différents points de l'anneau broyeur et pivote sur lui. Le cône broyeur, qui est d'un diamètre beaucoup plus petit que l'anneau, tourne autour de son axe d'une quantité juste suffisante pour éviter tout frottement qui entraînerait une dépense inutile de force motrice. Le point de rétrécissement entre l'arbre et l'anneau broyeur se déplace donc incessamment et uniformément dans ce dernier, et le point de rétrécissement maximum se réduit à chaque instant en une simple ligne ; c'est en cela que réside la particularité importante du broyeur conique par rapport au broyeur à mâchoires, qui pendant toute sa rotation n'atteint sa position la plus rétrécie que durant un instant, mais qui, à la vérité, travaille alors sur toute la surface des mâchoires, ce pourquoi il exige alors le concours d'une grande partie de la force emmagasinée dans les volants pour vaincre ce point difficile. Par suite, le broyeur à mâchoires ne travaille que par à-coups accompagnés de grand bruit et de violents ébranlements, tandis que le broyeur conique a une marche calme et silencieuse. En outre, comme il effectue un broyage complet, son rendement est bien plus élevé que celui du concasseur à mâchoires. Le mode de travail du broyeur conique est analogue à celui du broyeur cylindrique, qui agit également durant toute sa rotation, mais qui, eu égard à l'exigüité de son angle d'admission, ne peut mettre en œuvre que des morceaux relativement petits.

L'axe vertical du broyeur conique exécute donc un mouvement rotatif et oscillant, il est suspendu dans un collier supérieur à billes qui est supporté par la carcasse au moyen de deux fortes brides. A son extrémité inférieure il est guidé circulairement par un excentrique, de sorte que sa ligne médiane décrit une ligne conique qui occupe une position centrale par rapport à l'anneau broyeur. A la hauteur de ce dernier se trouve le cône broyeur, dont le mouvement a pour effet de resserrer et d'élargir progressivement la gueule de broyage. Lorsque la matière est suffisamment broyée, elle tombe sur un plan incliné qui l'évacue au dehors. Le broyage s'effectue d'une manière parfaite et uniforme. Les points d'attaque des forces de compression sont ré-

partis de telle sorte que l'écrasement de la matière s'effectue avec une grande facilité et n'exige qu'une faible dépense de force motrice.

Le broyeur à cône oscillant est actionné au moyen d'une poulie à courroie; celle-ci a la forme d'un volant et est accouplée avec l'arbre de transmission au moyen de goupilles de sûreté disposées dans une boîte qui est fixée sur l'arbre et engrènent avec le moyeu de la poulie à courroie. Ces goupilles de sûreté sont de simples boulons interchangeables, d'une résistance déterminée, qui se brisent dès que le broyeur est sollicité au-delà d'une quantité maxima, lorsque par exemple des corps non broyables, tels que des outils, des morceaux de fer, etc., pénètrent dans le broyeur.

*
* *

Pour la préparation des *matières tendres*, comme la marne, la craie et l'argile, on se sert de broyeurs à cylindres simples ou doubles, cannelés, lisses ou à pointes, suivant les cas. Ces appareils sont commandés par poulie formant volant et roue dentée; dans d'autres constructions chaque cylindre est commandé directement par une poulie spéciale. Pour chaque paire de cylindres, l'un tourne dans un coussinet fixe, l'autre dans un coussinet mobile; on évite ainsi tout danger de rupture dans le cas où viendrait s'interposer un corps étranger, un morceau de fer, etc. Ces sortes de machines fournissent un excellent travail et peuvent être facilement appropriées à la nature des matières mises en œuvre.

Broyeurs à cylindres dentés. — La figure 25 montre un broyeur à deux paires de cylindres dentés. Cette machine peut broyer des morceaux ayant jusqu'à 400 mm. et les réduire en fragments de la grosseur d'une noix mélangés de grains plus petits. Elle se compose de deux paires de cylindres superposées, actionnés par un engrenage avec poulies fixe et folle.

Suivant les exigences spéciales, les cylindres sont exécutés différemment, à savoir : les deux paires de cylindres sont dentés, ou bien la paire supérieure est dentée et celle d'en dessous lisse ou cannelée. Les cylindres dentés se composent d'une enfilade de disques en acier coulé ou en fonte durcie, tandis que les cy-

lindres lisses ou cannelés sont constitués par un bandage de fonte en coquille emmanché sur un noyau en fonte.

L'un des cylindres de chaque paire est monté dans des paliers fixes, l'autre dans des paliers mobiles. Le cylindre mobile est entraîné par le cylindre fixe au moyen de roues dentées d'accouplement. L'écartement est réglé par des vis qui s'appuient sur des ressorts de butoirs pour permettre au cylindre mobile de céder au passage de morceaux trop durs, d'objets en fer, etc., contenus accidentellement dans la matière.

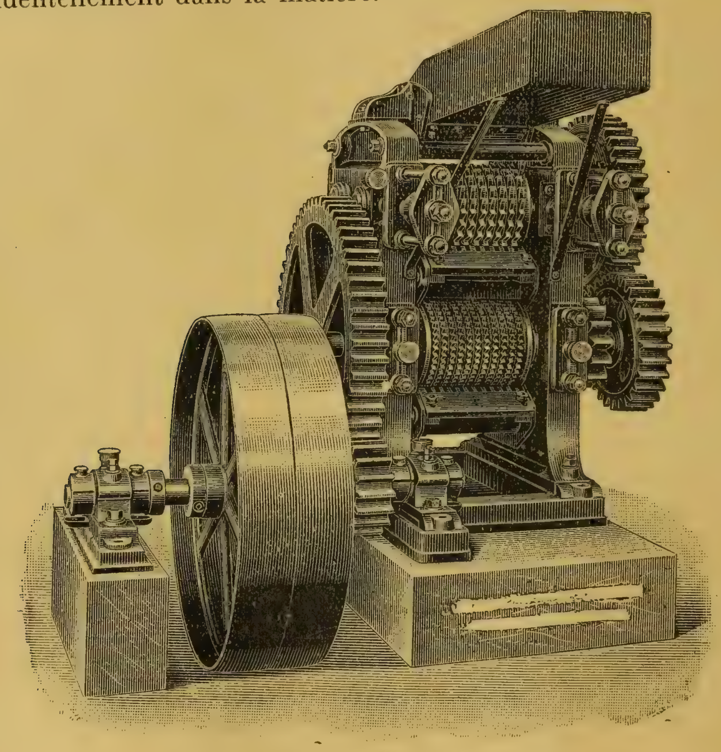


Fig. 25. — Broyeur à cylindres dentés

La matière est amenée aux cylindres supérieurs par une trémie alimentaire en fer. Ce broyeur est construit en deux modèles, dont l'un donne un rendement de 12.000 kg., l'autre de 20.000 kg. à l'heure, avec une dépense de force motrice de 10 à 20 chevaux.

Le broyage préparatoire de l'argile plus ou moins plastique, et presque toujours très humide (elle contient parfois jusqu'à 30 %

d'eau) exige l'emploi de machines spéciales appropriées à sa nature. Parmi les nombreux appareils imaginés à cet effet (granulateurs, machines à désagréger, etc), signalons le broyeur cylindrique système Baur-Pfeiffer frères. Ce broyeur est entouré d'une enveloppe perforée que traverse la matière broyée, tout en se divisant. Il se compose en principe de cylindres cannelés tournant en sens opposé et entourés d'un manteau perforé en acier. Ces ouvertures sont coniques vers l'intérieur, afin de n'opposer qu'une faible résistance au passage de la matière.

Les cylindres sont pressés l'un contre l'autre par des ressorts solides, réglables; leur travail se borne à comprimer la matière et à l'évacuer ensuite latéralement sous forme d'un boudin. Des ramasseurs de construction particulière découpent et mélangent le boudin dans sa marche à travers le broyeur. Les morceaux de fer et les pierres dures qui passent à travers les cylindres sont éliminés latéralement, ceux qui ne résistent pas à la pression des ressorts sont entièrement broyés.

Ces machines fournissent un excellent travail; dans certains cas il suffit d'en employer deux pour broyer les matières (craie, marne pas trop dures) telles qu'elles sont amenées de la carrière, les mélanger et les envoyer directement à la presse pour la confection des briques destinées à être cuites dans les fours des anciens systèmes. Il est clair que ce broyeur ne convient pas pour le broyage des corps durs.

DOSAGE ET MÉLANGE DES MATIÈRES

Les matières séchées et concassées sont réunies dans des silos assez grands pour contenir au moins la production d'une demi-journée; on est dès lors affranchi des inconvénients qui résultent d'accrocs éventuels dans le séchage ou le concassage. Les tuyaux d'écoulement doivent être placés à une hauteur suffisante, soit à environ 2 m. au-dessus du bord supérieur des rails, pour que les appareils mesureurs puissent être amenés en dessous. Ces appareils, montés sur chariot, sont remplis successivement de pierre calcaire et d'argile, et chaque mesure est pesée sur une bascule également montée sur le chariot. L'uniformité de la pierre calcaire permet souvent de la mesurer simplement et de ne peser que l'argile, ou inversement, ce qui simplifie considérablement la manipulation.

Un autre mode de prélèvement des matières du silo, appliqué d'abord avec succès par F. L. Smidth et par d'autres, consiste à amener la pierre calcaire séchée et concassée dans une balance automatique à l'aide d'une vis ou de tout autre système de transport, et de même l'argile dans une seconde balance automatique. Ces deux balances sont combinées ensemble de telle manière que l'une ne peut être vidée sans que l'autre ne le soit en même temps, de sorte qu'on est obligé de vider les deux simultanément. S'il s'agit, par exemple, de mélanger de la pierre calcaire et de l'argile dans la proportion de 5 : 2, on se sert de deux balances dont l'une déverse chaque fois 50 kg. de pierre à chaux, l'autre chaque fois 20 kg. d'argile. Il est clair que si les deux balances fonctionnent régulièrement et si on mélange convenablement les deux matières, on obtiendra un dosage absolument exact.

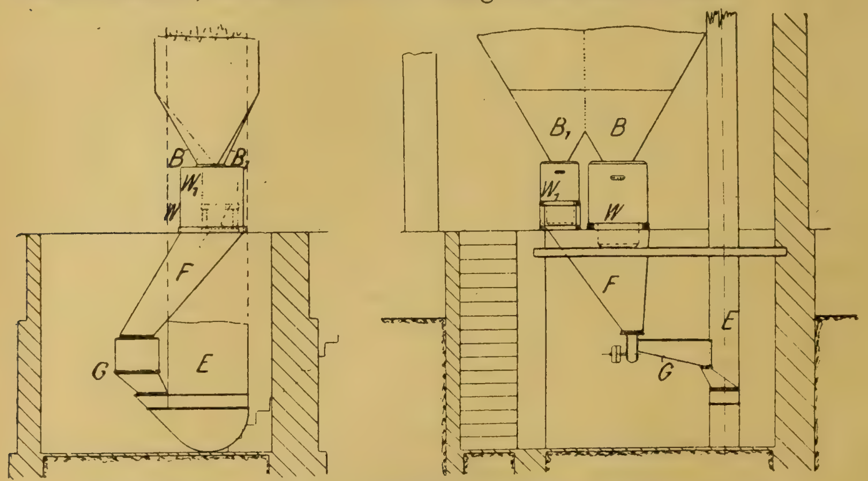


FIG. 26 et 27. — Vue de l'installation de pesage des matières brutes

Les figures 26 et 27 représentent une installation de pesage, BB[1] sont des réservoirs de pierre calcaire et d'argile, WW[1] les balances qui déversent les matières dans un récipient commun *F*; *G* est un secoueur et E un élévateur qui transporte les matières mélangées au point voulu pour la suite des opérations.

LE BROYAGE INTERMÉDIAIRE

La mouture fine de la pierre calcaire et de l'argile exige souvent un broyage intermédiaire après le séchage. Ce cas se présente notamment lorsque la mouture fine doit être effectuée à

l'aide de tubes broyeurs pour lesquels elles doivent être déjà à un certain état de finesse, tandis que tous les autres broyeurs finisseurs peuvent très bien recevoir les matières en grains d'une certaine grosseur. Pour les tubes broyeurs de petit modèle les grains ne doivent pas dépasser 1 mm. 5, ni 2 mm. 5 à 3 mm. pour ceux de grand modèle. Pour réduire les matières à ces degrès de finesse, on se sert de moulins à meules verticales, à meules cylindriques, ou encore de moulins coniques et de moulins à boulets.

Parmi les moulins à meules verticales on distingue : les moulins à meules tournant sur elles-mêmes et autour d'un arbre vertical sur une plate-forme fixe, et les moulins à plate-forme tournante dont les meules tournent seulement autour de leurs axes horizontaux, mais non autour de leur axe vertical. Dans les fabriques de ciment, ce second mode de construction est souvent employé.

Parmi les moulins du premier système, nous signalerons celui construit par les Ateliers d'Arlod.

La plate-forme sur laquelle tournent les meules est fixée sur une carcasse en fonte; elle est garnie de plaques en fonte durcie, faciles à remplacer. En dehors de la piste suivie par les meules se trouve une ouverture de sortie de la matière broyée, fermée par un registre; sur les deux points opposés de la plate-forme sont disposés deux ramasseurs qui ont pour but de ramener la matière sous les meules, tandis qu'un autre ramasseur évacue la matière broyée dans l'ouverture de sortie, d'où elle tombe dans un caniveau muni d'un système de transport. L'arbre vertical est fixé dans une gorge à sa partie supérieure, dans une crapaudine à sa partie inférieure; il est surmonté d'une trémie d'alimentation munie d'un tuyau de sortie, et tourne avec l'arbre de manière à déverser la matière devant les meules.

Cette machine peut être agencée pour un travail continu; il suffit pour cela de remplacer la porte de vidange par une grille par laquelle la matière broyée est évacuée d'une manière continue.

Broyeurs à cylindres. — Les broyeurs à cylindres pour le broyage intermédiaire se distinguent des broyeurs à cylindres concasseurs par certains détails de construction que nous allons indiquer. Dans les premiers, les cylindres ont un diamètre plus

petit et sont plus longs que dans les seconds ; les dispositifs de chargement et de réglage des cylindres sont particulièrement soignés. La carcasse de la machine est solide, mais moins massive que pour les broyeurs-concasseurs dont le travail est beaucoup plus lourd.

Dans les broyeurs intermédiaires à cylindres ceux-ci tournent à une vitesse différentielle dont on peut faire varier le rapport suivant la nature des matières traitées et le degré de finesse qu'on veut obtenir, par la manœuvre d'un régulateur agissant sur des roues dentées. L'introduction de la matière est réglée au moyen de deux cylindres tournant à des vitesses différentielles. Les cylindres broyeurs ont un diamètre d'environ 400 mm. et une longueur de 1 m. : ils tournent l'un dans des coussinets fixes, l'autre dans des coussinets mobiles qui se déplacent lorsqu'un corps étranger vient à passer entre les cylindres. Un système de réglage permet de faire varier le parallélisme des deux cylindres et, par suite, la finesse du broyage. Un système de ramasseurs nettoie constamment les cylindres et ramène les matières sur la piste. Le rendement de ces broyeurs est de 4.000 à 8.000 kg à l'heure, avec une dépense de force motrice de 10 à 12 chevaux.

Moulin à croisillon percuteur. — Cette machine se compose essentiellement d'un bâti avec cage de broyage verticale dans laquelle un croisillon percuteur tourne à une grande vitesse. La cage est formée de deux parois latérales, d'une enveloppe demi-cylindrique en fer forgé et d'une grille demi-cylindrique en deux pièces ou complètement cylindrique en quatre pièces. Les parois latérales sont garnies à l'intérieur de plaques cannelées en fonte durcie.

Suivant les dimensions du moulin, la matière à broyer peut être en fragments variant de la grosseur d'un œuf à deux fois celle du poing. Quand on la charge dans la trémie d'alimentation, elle est saisie par les percuteurs, projetée sur la plaque de broyage et les barreaux d'acier ; elle subit ainsi une trituration très énergique. Quand elle est réduite à une finesse suffisante, elle passe entre les barreaux de la grille sous forme d'un produit pulvérulent contenant une proportion plus ou moins grande de sablettes ; on varie l'écartement suivant la finesse qu'on veut obtenir.

Ce moulin est construit en cinq modèles, la chambre de broya-

ge ayant un diamètre allant de 650 à 1.500 mm. pour un rendement allant de 3.000 à 15.000 kg (force 2 à 20 chevaux).

Les broyeurs à meules verticales et les broyeurs à cylindres peuvent servir indifféremment pour le broyage des matières dures ou tendres, tandis que le moulin à croisillon percuteur, le broyeur Carr et les autres machines basées sur le même principe sont employées exclusivement pour le broyage des matières tendres, telles que l'argile et les marnes.

BROYAGE FIN

Dans les premiers débuts de la fabrication du ciment, on effectuait le broyage fin à l'aide des moulins à meules, et l'on se contentait de la finesse ainsi obtenue : dans la suite, on combinait le moulin avec un tamis cylindrique et on faisait retourner le refus du tamis dans le moulin. Il y a environ 30 ans, on commença à se servir du broyeur à boulets muni de tamis et on obtint de bons résultats pour l'époque. Les premiers modèles de ce broyeur travaillaient d'une manière discontinue, c'est-à-dire que le chargement et la vidange s'opéraient à intervalles réguliers ; bientôt on songea à transformer la machine pour assurer la continuité des opérations et on créa ainsi un outillage à grand travail pour répondre aux exigences sans cesse croissantes de l'industrie du ciment.

Dans ces derniers temps on a inventé, en outre, un grand nombre d'autres appareils qui seront décrits plus loin. Leur emploi pour le broyage fin des matières premières est de date récente, car la plupart d'entre eux présentaient d'abord l'inconvénient, lorsque les matières n'avaient pas le degré de siccité voulu, de ne donner qu'un faible rendement quantitatif et qualitatif, et dans ces conditions on avait tout intérêt à maintenir les anciens systèmes de mouture. Mais les améliorations incessantes apportées au séchage des matières ont fait disparaître cet obstacle et, selon toute apparence, les moulins à meules, déjà refoulés des usines pour le broyage des clinkers, courent le risque d'être également remplacés par les nouveaux appareils susmentionnés pour le broyage fin des matières brutes. Quoi qu'il en soit, le nombre des usines est considérable qui s'en tiennent encore aux moulins à meules pour le broyage fin. Nous donnerons donc la description de ces appareils.

Le moulin à meule horizontale est une des machines les plus anciennes dont l'homme se soit servi pour broyer les matières les plus diverses : grains, couleurs, os, tan, liège, matières minérales de toutes sortes, etc. Le principe sur lequel il est basé, consiste à placer la matière entre deux meules plates circulaires et à la broyer par le frottement d'une meule tournante sur l'autre, qui est immobile. Dans cette opération, le broyage est effectué par la pression exercée sur la matière, par sa durée et par le degré de rapprochement des deux meules l'une de l'autre. Un moulin à meules doit donc être construit de manière que l'ouvrier puisse modifier facilement ces trois facteurs, suivant les exigences du travail de broyage.

Les moulins à meules horizontales sont construits soit à meule dormante supérieure, soit à meule dormante inférieure, suivant que c'est la meule inférieure ou la meule supérieure qui est mise en mouvement. On emploie de préférenace les moulins du premier système pour le broyage des matières très dures, ceux du second pour les matières tendres.

Le bâti est formé de colonnes en fonte ou d'un support creux en fonte sur lequel est montée la cage des meules, qui est également en fonte. L'arbre du moulin est maintenu par le haut dans un coussinet mobile à collet ; sa partie inférieure repose dans une crapaudine. Le coussinet à collet est vissé sur le fond de la cage à meules et complètement préservé de la poussière.

Le réglage de la meule tournante se fait au moyen d'une vis sans fin et d'une roue-hélice, ou encore au moyen d'une transmission par leviers avec vis et volant à main.

Le nombre de tours est de 120 par minute pour les meules de 1.500 mm. de diamètre. Dans ces conditions, un moulin peut moudre environ 5.000 kg de matière par heure, avec une force d'environ 20 chevaux. Le moulin est alimenté au moyen d'un élévateur à godets et d'une trémie à secousses ; un seul ouvrier peut, avec un aide, desservir deux paires de meules placées côte à côte. Les moulins d'un même groupe sont généralement commandés par un arbre principal unique par l'intermédiaire d'engrenages droits.

D'une manière générale, on installe trois paires de meules, dont l'une est en rhabillage.

Pour le broyage des matières premières du ciment, la meule

dormante supérieure a exceptionnellement un diamètre de 1.500 mm. et la meule courante inférieure le plus souvent un diamètre de 1.250 mm. ; la meule gisante a une hauteur de 300 à 400 mm., la meule tournante une hauteur de 450 à 500 mm. Le nombre de tours est généralement de 125 à la minute pour les meules de grande dimension, et de 130-140 pour les meules plus petites. On peut évidemment augmenter le rendement en donnant à la meule une vitesse plus grande, mais en même temps on augmente le danger de production d'étincelles ; le mieux est donc de s'en tenir aux règles ci-dessus. La meilleure pierre à employer pour le broyage des corps très durs, tels que ceux qui entrent dans la fabrication du ciment, est le quartz poreux de la Ferté-sous-Jouarre (Seine-et-Marne) ; il est rare cependant de trouver du quartz en blocs assez gros et assez résistants pour en confectionner des meules d'une seule pièce ; c'est pourquoi celles-ci se composent généralement d'un certain nombre de pièces cimentées et maintenues ensemble par des cercles de fer.

Le broyage des corps durs a pour effet de faire disparaître rapidement la rugosité naturelle de la meule; il ne se fait plus alors que par la pression, mais non par déchirement. Il est donc nécessaire, pour assurer l'efficacité de travail des meules, de les rhabiller de temps en temps; le rhabillage consiste à y creuser des raies de section et de profondeur déterminées, partant du centre de la meule. La forme des raies a été l'objet de recherches théoriques auxquelles il serait trop long de nous arrêter.

Le rendement des moulins à meules et la dépense de force motrice dépendent d'un grand nombre de facteurs; ils varient considérablement suivant la dureté, la ténacité et le degré de siccité des matières traitées, leur degré de concassage préalable, et enfin l'état des meules. En supposant que la matière mise en œuvre soit de dureté moyenne, bien sèche et concassée à la grosseur voulue, on obtiendra en moyenne avec un moulin à meule tournante supérieure de 1.500 mm. de diamètre, un rendement de 1.400 à 1.500 kg. à l'heure; avec un moulin à meule tournante inférieure de 1.250 mm. de diamètre, un rendement de 1.000 à 1.200 kg. à l'heure en poudre ne donnant que 1 à 2 % de refus sur le tamis à 900 mailles et 18 à 20 % de refus sur le tamis à 5.000 mailles, avec une force de 20 à 25 chevaux dans le premier cas et de 16 à 18 chevaux dans le second.

BROYEURS A BOULETS

Les broyeurs à boulets sont connus depuis longtemps; on s'en servait déjà en France au commencement du XIX[e] siècle pour le broyage des matières tendres, telles que le salpêtre, le charbon, l'indigo, le gypse, etc.; les opérations étaient d'ailleurs intermittentes. Dans la suite on les fit servir également au broyage de matières dures, notamment des minerais, qui donnèrent lieu à la construction d'un grand nombre de modèles nouveaux; mais ceux-ci n'atteignirent pas le but proposé et furent bientôt abandonnés. Le moulin à boulets ne devait acquérir toute son importance que lorsqu'on eut appris à en faire un appareil à travail continu, car la continuité est un facteur indispensable dans l'industrie moderne.

Le premier broyeur à boulets muni de tamis à travail continu date de 1876; il fut construit par les frères Sachsenberg à Rosslau. Depuis cette époque, il a été l'objet de nombreux perfectionnements protégés par des brevets. Certains constructeurs en ont fait une spécialité; le plus important d'entre eux est actuellement la maison Fried-Krupp-Grusonwerk, à Magdebourg, avec 3.000 exemplaires en fonctionnement.

Le broyeur à boulets se compose d'un tambour rotatif entouré d'une double enveloppe en tôle et contenant un certain nombre de boulets de différentes dimensions. Sur la face intérieure des fonds, le tambour est garni de plaques de blindages planes en acier; le pourtour est composé de plaques triturantes en acier très dur, et de forme telle qu'elles créent une chute entre deux pièces consécutives. Il s'ensuit que pendant la rotation, les boulets tombent d'une plaque sur l'autre et roulent pendant l'intervalle compris entre deux chutes. La mouture est ainsi effectuée par choc des boulets et par frottement.

La matière soumise à l'action des boulets passe à travers des trous pratiqués dans les plaques triturantes et tombe sur un premier tamis, dit tamis protecteur, qui retient les petits fragments de la matière et ne laisse passer que les grains d'une certaine finesse. Les grains fins tombent alors sur un second tamis, qui est le tamis extérieur, dont la toile métallique est choisie suivant la finesse à obtenir. La poudre qui a la finesse voulue traverse cette toile et tombe dans l'entonnoir de décharge à la partie inférieure de l'appareil, où elle peut être ensachée. Les refus des deux

tamis sont ramenés dans l'intérieur du moulin par des ouvertures ménagées à cet effet, et sont de nouveau soumis à l'action des boulets.

L'alimentation du broyeur se fait au moyen d'une trémie installée sur l'un des moyeux qui présente des bras en formes d'hélice. Pendant la rotation de l'appareil, ceux-ci amènent les morceaux à l'intérieur à la façon d'une vis sans fin.

L'enveloppe en tôle est reliée par une manche en toile à une cheminée qui permet de maintenir l'équilibre de pression dans l'enveloppe et d'évacuer les poussières qui se dégagent de la matière pendant le broyage.

Le poids des boulets varie suivant la nature et la qualité de la matière mise en œuvre. Les moulins actuellement employés ont une longueur allant de 500 à 2.800 mm. et un diamètre allant jusqu'à 1.650 mm.; la charge des boulets varie de 350 à 3.000 kg. Ceux-ci sont naturellement sujets à usure; il est donc nécessaire de vérifier leur poids de temps en temps.

Pour mettre le broyeur en marche, on le fait tourner à vide pendant une demi-heure pour vérifier si les coussinets ne s'échauffent pas. Ensuite seulement on y charge les boulets et la matière à broyer. Le tambour doit toujours être plein. Par conséquent, dès qu'on en a retiré un sac de matière moulue, on en charge une égale quantité par la trémie. Lorsque le moulin ne contient pas une charge suffisante, sa production est faible et l'ouvrier est tenté d'augmenter la charge des boulets, ce qui donne lieu à de nombreux inconvénients.

Les tamis extérieurs sont montés sur cadres en bois de chêne, portant des marques qui empêchent de les intervertir, car ils ne sont pas interchangeables. Pour aveugler les fuites ou déchirures qui peuvent s'y produire, le plus simple est de coller dessus des morceaux de tissu de coton avec de la colle de poisson. Pendant les arrêts on visite soigneusement l'intérieur du tambour, on serre les vis des cadres et celles de la porte qui ferme le trou d'homme, car malgré l'emploi de doubles vis, elles sont exposées à se relâcher sous l'influence de la trépidation à laquelle elles sont soumises. On aura soin de tenir les tamis dans un état de parfaite propreté. Si l'on s'aperçoit que le rendement du moulin diminue, on s'empresse de procéder au nettoyage intérieur et extérieur du tamis; à cet effet, on soulève la double enveloppe au moyen d'une chaîne à contre-poids.

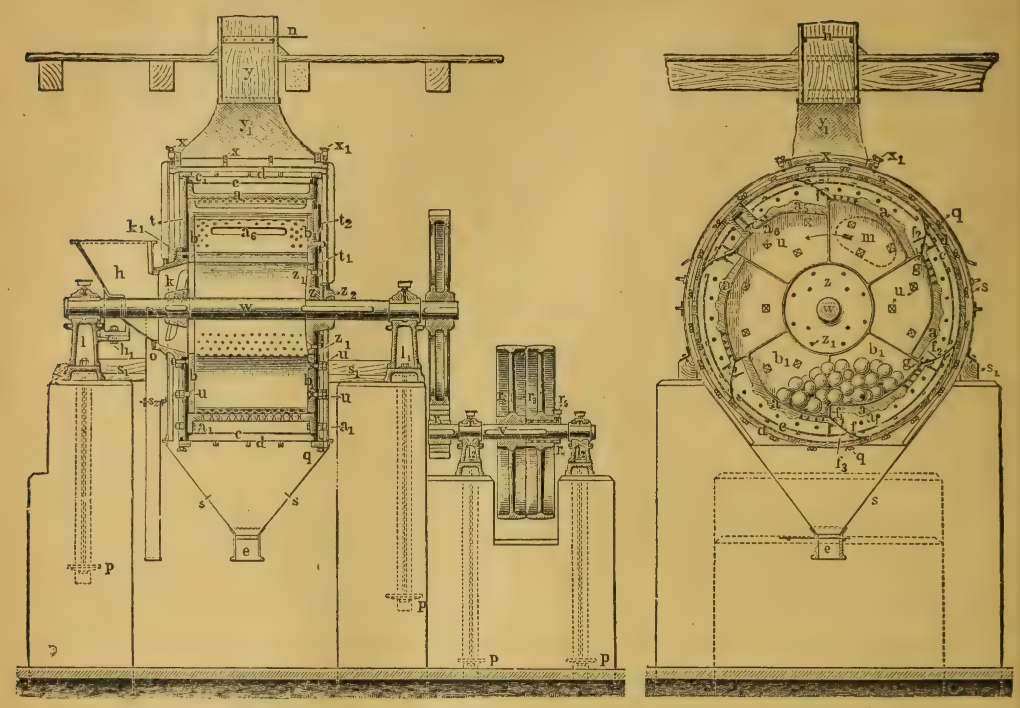


Fig. 28 et 29. — Broyeur à boulets. Coupes longitudinale et transversale

Nomenclature des pièces détachées du moulin à boulets

a plaques triturantes perforées.
a^1 vis de brides.
b^5 plaque de cheminée.
a^6 couvercle de cheminée.
b plaques latérales (côté de l'alimentation).
b^1 plaques latérales (paroi d'arrière).
u vis de plaques latérales.
c crible dégrossisseur.
c^1 vis de crible dégrossisseur.
d tamis fins (châssis avec tissu).
q vis de châssis de tamis.
e entonnoir de décharge de la cage à poussière.
f palettes de retour.
f^1 vis de palettes.
f^2 cribles de protection.
f^3 supports du crible dégrossisseur.
g ouvertures pour la rentrée des matières.
h trémie d'alimentation.
h^1 vis de pied de trémie.
k^1 vis de moyeu d'alimentation.
l palier de trémie.
l^1 palier d'arrière.
l^2 paliers d'engrenage.
n registre.
p plaque d'ancrage.
r roue dentée.
r^1 pignon.
r^2 poulie fixe.
r^3 poulie folle.
r^4 boîte pour id.
r^5 graisseur.
s cage à poussière.
s^1 supports en bois.
s^2 trémie collectrice avec tuyau.
t paroi latérale antérieure.
t^1 paroi latérale postérieure avec trou d'homme m.
t^2 couvercle du trou d'homme.
v arbre d'engrenage.
w arbre principal.
x châssis de la cage à poussière.
x^1 cornière du châssis.
y cheminée d'aération.
y^1 raccord en toile grossière.
z moyeu d'arrière.
z^1 vis de ce moyeu.
z^2 vis de fixation.

Comme nous l'avons dit plus haut, le broyeur à boulets est surmonté d'une cheminée; celle-ci débouche dans une chambre à poussière située à l'étage au-dessus, dans laquelle se dépose la poussière entraînée par l'air chaud; cette chambre est elle-même munie d'un tuyau de ventilation situé du côté opposé à celui du moulin. De la partie antérieure de la chambre, c'est-à-dire de l'endroit où s'amasse la poussière, partent deux tuyaux, fermés par des registres, qui permettent de renvoyer dans la salle des broyeurs la poussière recueillie.

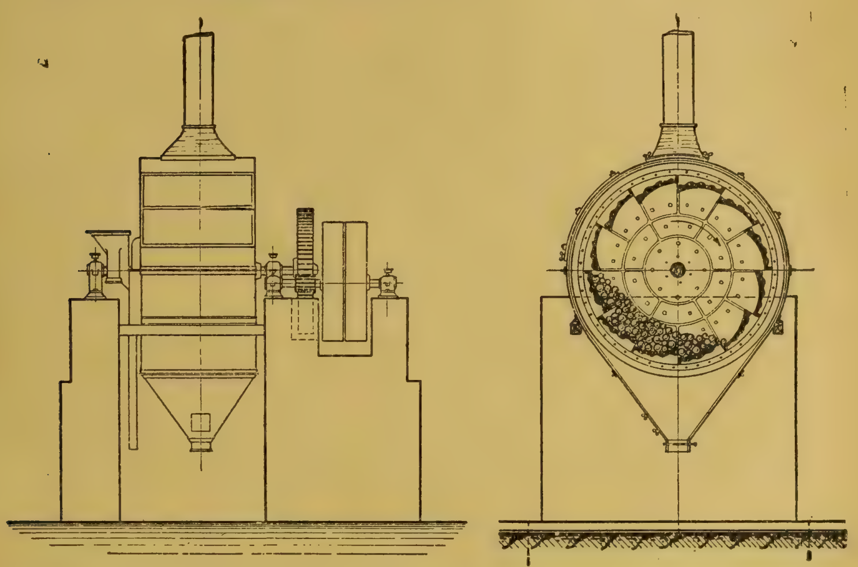


Fig. 30. — Broyeur à boulets des Ateliers d'Arlod

On recommande également de combiner avec la chambre à poussière un ventilateur destiné à renouveler l'air de la salle des broyeurs; la quantité de poussière qui s'amasse dans la chambre est alors plus considérable, ce qui exige un nettoyage plus fréquent. Il suffit d'un ventilateur à 200 tours pour deux moulins.

Le rendement de ce broyeur varie suivant la nature de la matière mise en œuvre, de 400 à 1.400 kg. de poudre fine ou de 900 à 3.000 kg. de sablettes à l'heure pour le clinker de four ancien; à ces rendements correspond une dépense de force motrice de 5 à 60 chevaux.

Bi-broyeur Pfeiffer frères. — A la suite de nombreuses expériences, MM. Pfeiffer ont démontré que dans les broyeurs à bou-

lets la matière broyée, au lieu de sortir uniformément par les fentes ménagées à cet effet sur toute la longueur du tambour, avait une tendance à s'évacuer principalement aux extrémités. Ils se sont basés sur ce principe pour construire le bi-broyeur, appareil à grand rendement que nous allons décrire (fig. 31 et 32).

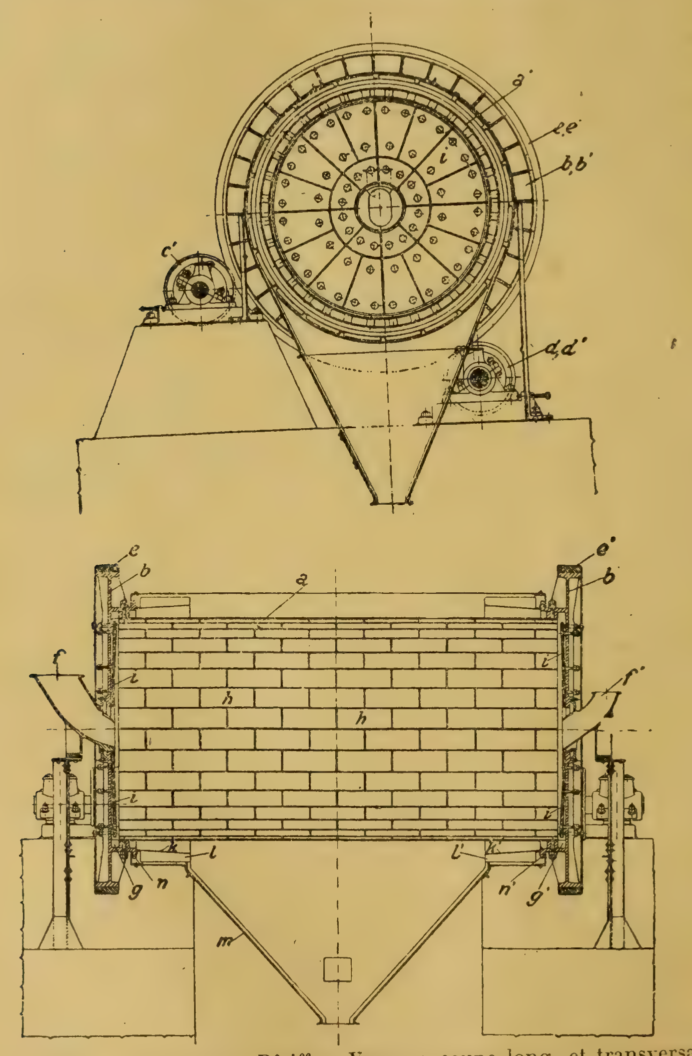


Fig. 31 et 32. — Bi-broyeur Pfeiffer. Vues en coupe long. et transversale

Le tambour *a* est muni de deux fortes plaques frontales b b^1 et tourne sur quatre galets c c^1, d d^1, ces deux derniers étant

montés sur un arbre commun (de transmission) et actionnant le tambour par friction. Sur les plaques frontales sont montés des anneaux de roulement e e^1 en acier laminé. Le tambour est alimenté au moyen de trémies f f^1 : la matière fraîche est introduite en f, et les sablettes venant du séparateur à air en f^1. La matière broyée sort par lès ouvertures annulaires g g^1. Le tambour et les plaques frontales sont munis de plaques de blindage h, i. Les plaques i servent en même temps à régler le diamètre de la fente de sortie. Sur les plaques frontales sont boulonnés des anneaux en tôle k k^1 munis de palettes inclinées l l^1 qui se meuvent devant les fentes n n^1 ménagées entre le broyeur et le manteau, ces palèttes servent de ventilateurs et empêchent la poussière de sortir de l'appareil.

Ce qu'il y a de remarquable dans cet appareil, c'est la suppression des engrenages, qui sont remplacés ici par la transmission par galets. Dans l'agencement symétrique usuel des galets de roulement, il est impossible de s'en servir pour la transmission du mouvement, parce que la pression exercée sur eux par le poids de la machine est insuffisante pour le développement de la force nécessaire. Dans la construction du bi-broyeur les galets sont disposés de telle sorte que le poids de la machine porte presque entièrement sur les galets moteurs d d^1, comme le montre la figure 32, tandis que les galets c c^1 ne servent que de supports. Cette disposition ingénieuse des galets permet d'exercer sur eux une pression largement suffisante pour l'entraînement de la machine par simple friction. Comme on le voit, ce mode de construction présente de réels avantages; il permet non seulement de supprimer les engrenages, leur entretien et les réparations incessantes, mais encore de réaliser une économie de force motrice, économie que les constructeurs évaluent à 10 %. Cette machine peut moudre à l'heure 8.000 kg de clinker de four rotatif à une finesse correspondant à 11,4 % de refus sur le tamis à 5.000 mailles par cm², avec une force motrice de 185 HP.

Tube broyeur. — Il y a une trentaine d'années, le broyage du ciment s'opérait presque exclusivement à l'aide de moulins à meules. A cet effet, les roches de ciment étaient préalablement dégrossies à l'aide de concasseurs à mâchoires et de laminoirs, et réduites ensuite en poudre à l'aide de meules horizontales; le ciment sortant des meules passait dans les bluteries qui sépa-

raient le fin des sablettes et celles-ci étaient repassées dans les meules.

Par ce procédé on arrivait pratiquement à des finesses correspondant à un refus de 30 à 35 % sur le tamis de 4.900 mailles. On savait déjà que la qualité du ciment augmentait considérablement avec la finesse; mais le travail par les meules et autres procédés connus ne permettait pas, en pratique, de faire plus fin, à moins qu'on ne serrât davantage les meules, et dans ce cas elles absorbaient beaucoup plus de force motrice. De plus, le blutage sur tamis très fin devint également très difficile à cause de la dureté du ciment qui use très rapidement les toiles fines. — Enfin, le grand nombre de bluteries nécessaires pour obtenir le ciment fin demandait une surveillance très attentive et un emplacement exagéré.

A cette époque, Davidsen réussit à changer cet état de choses; par son système il arrivait à obtenir du ciment broyé très fin avec des frais bien moindres tout en supprimant le blutage.

Son système se base sur l'emploi d'un nouveau broyeur qu'il avait inventé et qu'il appelait *tube-broyeur*. Cet appareil consiste simplement en un long tube tournant autour de son axe horizontal et chargé d'une grande quantité de galets de silex.

La matière à broyer était introduite par le tourillon dans l'un des fonds et sortait par l'autre bout du tube.

Pourvu que la matière fut convenablement préparée avant son introduction dans le tube-broyeur, on était maître de la finesse à obtenir en faisant varier simplement la quantité de matières introduites dans le tube; plus on y introduisait de matières, moins le broyage était fin.

Le système qu'il appelait bi-broyage consiste donc à diviser le broyage en deux parties :

1° Broyage préparatoire réduisant les roches à une finesse uniforme;

2° Broyage fin à l'aide du tube-broyeur n'exigeant pas de blutage. Actuellement, la première phase de la préparation s'effectue généralement dans des moulins à boulets des divers systèmes, munis de toiles métalliques ou de tamis, et donnant un produit dont la finesse correspond à celle des tamis 20 à 40.

Les tubes broyeurs se composent en principe d'un tambour horizontal dont les parois frontales sont renforcées de plaques en

acier; le tambour est rempli presque à moitié de corps broyeurs tels que des boulets en acier ou des galets de silex. Sur l'un des côtés, généralement celui de chargement, le tambour porte une couronne dentée qui sert à lui donner le mouvement qu'elle reçoit d'une roue de commande, cylindrique ou conique, suivant les circonstances où l'on se trouve; la commande par roue cylindrique est toujours préférable. Le tambour tourne sur ses deux pivots; il est soutenu par des galets de roulement.

Les dimensions du tube broyeur varient considérablement. Elles dépendent de la nature et de la dureté des matières à broyer, du rendement et de la finesse qu'on veut obtenir.

La figure 33 montre l'intérieur d'un tube broyeur. Celui-ci tourne sur ses deux pivots qui sont creux. Le pivot du côté gauche se termine par une petite hélice de construction spéciale qui pénètre dans l'intérieur du tambour, y fait arriver les matières et en même temps forme un arrêt pour les boulets qui roulent dans l'intérieur du broyeur. Du côté droit où s'effectue la sortie de la matière, le tambour est fermé par un fond perforé qui laisse passer la matière, mais retient les boulets. Le frottement des corps broyeurs sur la surface intérieure du tambour a pour effet de l'user rapidement ; pour parer à cet inconvénient on la renforce par des plaques en fonte ou en acier, ou bien par un revêtement en silex. L'intérieur du tambour est accessible par deux trous d'homme par lesquels on introduit les corps broyeurs et les plaques du revêtement.

Les matières, introduites uniformément du côté gauche, cheminent à travers le tambour en subissant l'action des corps broyeurs. Elles quittent l'appareil du côté opposé en traversant le fond perforé et passent finalement encore par un tamis (ouvertures 8 × 30) qui en sépare les éclats de fer qui ont pu se détacher des boulets ou les fragments de matière d'une dureté spéciale qui auraient échappé au broyage.

Le rendement d'un tube broyeur dépend à la fois de son diamètre, de la vitesse circonférentielle du tambour, du poids et du nombre des corps broyeurs qu'il contient. Il suffit donc de modifier ces facteurs pour augmenter ou diminuer le travail de la machine.

Les tubes broyeurs sont construits en dix modèles, dans lesquels la charge des corps broyeurs varie de 500 à 26.000 kg. et la dé-

pense de force motrice de 5 à 260 HP. Le rendement varie suivant les facteurs indiqués plus haut, et, en outre, suivant la finesse des grains soumis au broyage et celle de la farine achevée. Ainsi, un tube à 26.000 kg de corps broyeurs peut moudre par heure environ 10.000 kg de ciment de four rotatif, à 5-6 % de résidu sur tamis à 5.000 mailles. Comme broyeur intermédiaire, on se sert ici d'un broyeur à 5.200 kg de corps broyeurs. La dépense de force motrice pour ce rendement est au total de 360 HP, dont 100 HP sont afférents au broyeur et 260 HP au tube broyeur. Cependant, le rendement varie suivant les cas, il peut même atteindre le double de celui que nous venons d'indiquer, avec une finesse correspondant à un refus de 15 % sur le tamis de 5.000 mailles.

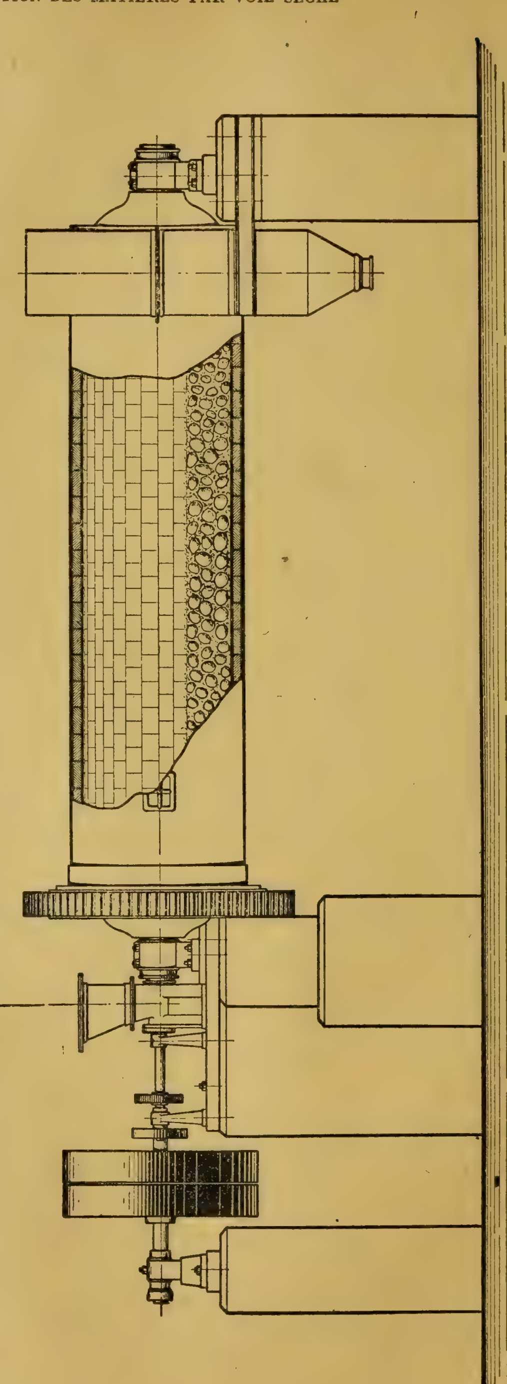


Fig. 33. — Tube broyeur des Ateliers d'Arlod

Les tubes broyeurs des différents cons-

tructeurs ne diffèrent entre eux que par le mode d'évacuation de la poudre ; dans l'appareil de Smidth elle sort par des fentes ménagées dans la périphérie du tambour, tandis que dans les autres elle sort par l'axe creux du tambour ; cette différence cependant est sans influence sur le fonctionnement et le rendement du broyeur, elle évite seulement le dégagement de poussière.

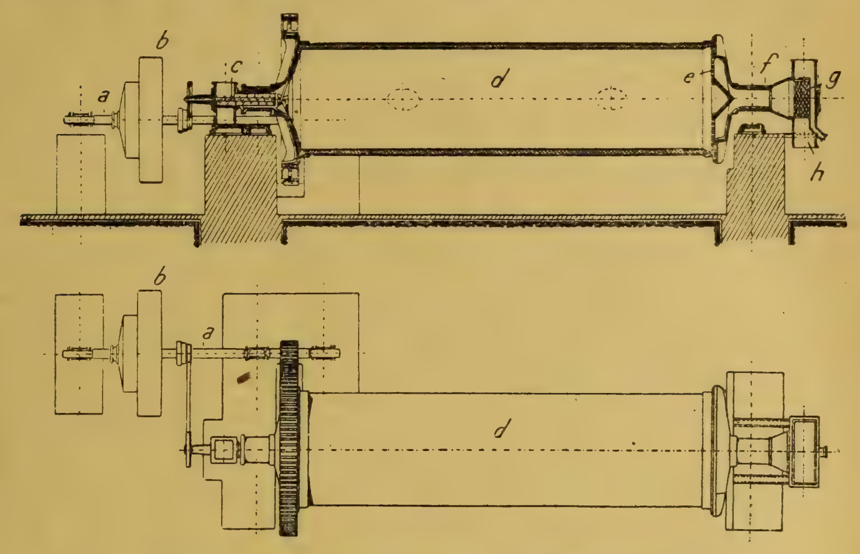


Fig. 34 et 35. — Tube broyeur à évacuation centrale

Les figures 34 et 35 montrent un tube broyeur à évacuation centrale. *a* et *b* sont les organes moteurs, *c* la trémie d'alimentation, *d* le tambour broyeur garni de blindage, *e* la paroi frontale à évacuation centrale de la poudre, *f* le tourillon creux par lequel est évacuée la matière, *g* un tamis destiné à retenir les fragments de silex, *h* le conduit d'évacuation.

D'une manière générale, les tubes broyeurs présentent le grand avantage d'être très résistants à l'usure et de n'exiger que peu de réparations. D'après Smidth, l'usure au broyage est de 1 kg de silex par 10 t. de clinker de four droit, et de 1,5 kg au broyage du clinker de four rotatif. La durée du blindage au silex est souvent de plusieurs années ; les broyeurs qui en sont garnis fonctionnent parfois pendant 600 à 700 heures sans aucune réparation.

Pour fournir de la poudre fine, le tube broyeur doit avoir

une certaine longueur, qui est toujours un multiple du diamètre du tambour. Par conséquent si l'on raccourcit le tube, on obtiendra surtout des sablettes. La machine de la figure 36 est construite sur ce principe; elle sert au broyage intermédiaire (granulation) des corps très durs, comme le clinker de four rotatif, le broyage fin s'effectuant alors par un seul passage au

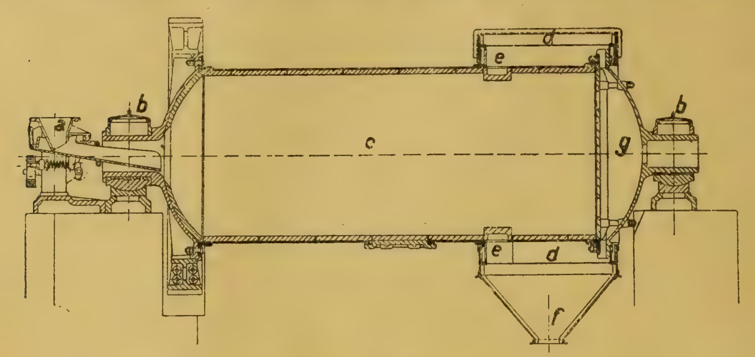


Fig. 36. — Tube broyeur pour le broyage intermédiaire

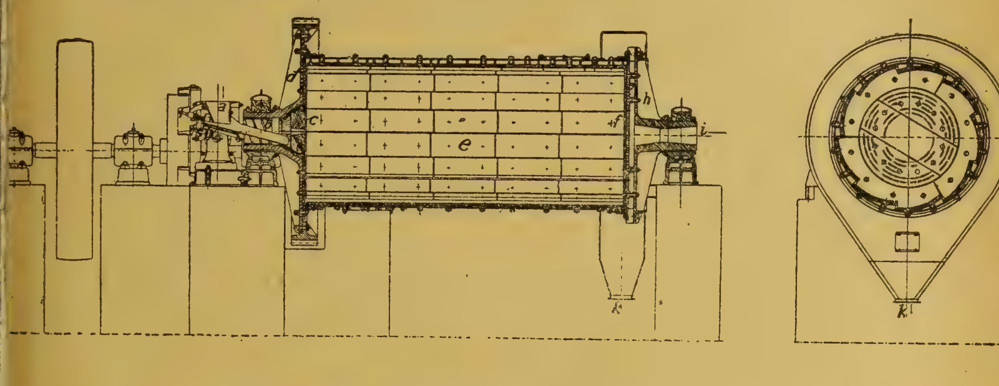
broyeur-finisseur. Cette combinaison permet de supprimer le tamisage de la matière entre les deux broyages.

Le tube *c*, garni de plaques de blindage et chargé de boulets broyeurs, tourne sur les tourillons creux ; il est actionné par une poulie de commande au moyen d'un jeu d'engrenages. *a* est la trémie d'alimentation, *d* et *g* sont des tamis qui laissent passer le produit achevé, tandis qu'ils retiennent les gros fragments (2 à 3 %), qui retournent au broyage. Ce broyeur sert aussi bien au broyage humide qu'au broyage sec : dans le premier cas la matière s'évacue par le tourillon creux *b*, dans le second cas par la trémie *f*. La finesse du broyage dépend essentiellement de l'alimentation : celle-ci une fois réglée pour la finesse voulue, la machine fonctionne automatiquement. Ce broyeur est construit en dix modèles, le diamètre du tambour varie de 1.500 à 1.800 mm et la longueur de 2.500 à 4.000 mm. Le plus petit modèle reçoit une charge de 6.000 kg de boulets, et exige une force de 65 HP ; le plus grand modèle reçoit une charge de 12.000 à 16.000 kg. de boulets et exige une force de 140-160 HP.

Le broyeur représenté par les fig. 37 et 38 constitue également un tube broyeur raccourci. *e* est le tambour garni intérieurement de plaques de blindage, tournant sur pivots creux

b et *i* de la manière connue. La matière est chargée à l'aide d'un appareil d'alimentation dans la trémie *a*, passe par le tourillon creux *b* derrière lequel se trouvent des palettes *c* destinées à empêcher le refoulement de la matière. *b* est la paroi frontale munie de fentes pour la sortie de la matière qui se rend dans la chambre *h* et de là dans la trémie *k*. Celle-ci est reliée à un système de dépoussiérage.

Ce broyeur fonctionne comme broyeur-finisseur. A cet effet, il est combiné avec un séparateur à air qui sépare incessamment le fin et fait retourner les sablettes dans le tube. Le rendement horaire de cette machine est de 4.300 kg de ciment de four rotatif à 17 % de résidu sur le tamis à 5.000 mailles ; la force motrice nécessaire est de 125 HP.



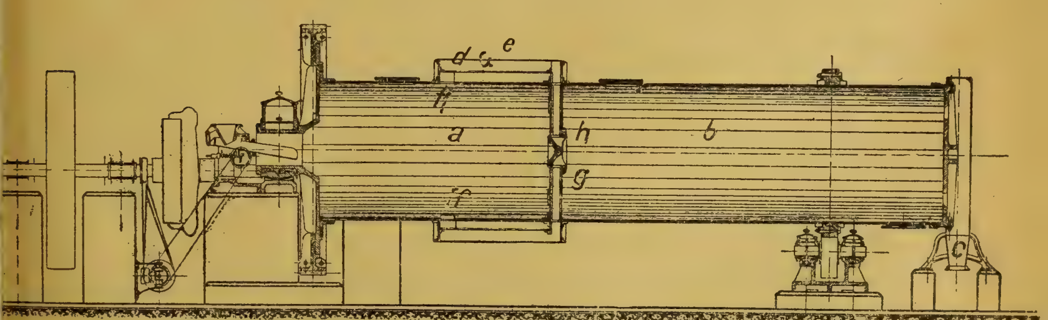


Fig. 37 et 38. — Tube broyeur raccourci
Fig. 39. — Tube broyeur compound

Tubes broyeurs compound. — Depuis quelques années déjà les constructeurs s'étaient efforcés, dans un but de simplification, de combiner le moulin à boulets et le tube broyeur de ma-

nière à les réunir en une seule machine. L'application de ce principe a donné naissance aux *broyeurs compound*. Ces machines, de quelque système qu'elles soient, ont ceci de commun que le tambour broyeur est divisé par un diaphragme en deux chambres, dont la première, plus courte, chargée de gros boulets broyeurs, sert au broyage intermédiaire des matières ; tandis que la seconde, plus longue, chargée de boulets plus légers ou de pierres de silex, sert au broyage fin des sablettes produites dans la première.

La figure 39 représente un broyeur compound, celui-ci est de même diamètre dans toute sa longueur, et tourne par conséquent à une vitesse circonférencielle uniforme. La matière est chargée dans une trémie disposée sur le tourillon creux, elle passe dans la chambre de broyage préparatoire *a* et est tamisée à travers les fentes du manteau en tôle *d* ; le refus retourne dans la chambre *a* par les ouvertures *f*, tandis que les parties qui sont à la finesse voulue passent par le second manteau *e* dans la chambre de broyage intermédiaire *g*, de là elle est envoyée par un système de palettes dans la chambre *b* où s'effectue le broyage fin. Le produit achevé est évacué en *c*. L'extrémité antérieure du broyeur tourne sur le tourillon dans un palier à billes, tandis que l'extrémité postérieure roule sur galets réglables. Le degré de finesse de la farine dépend du réglage de l'appareil d'alimentation.

Ce broyeur est construit en six modèles, dont le diamètre varie de 1.150 à 1.800 mm et la longueur du tambour de 8,2 à 10 m. La charge des boulets va de 3.200 à 13.000 kg, celle des pierres de silex de 3.500 à 10.000 kg.; la dépense de force motrice varie de 60 à 260 HP.

Le tube broyeur compound à trois degrés de broyage représente actuellement la forme la plus accentuée du principe de travail à la machine. Fractionner encore davantage les opérations dans une seule et même machine serait s'exposer à la compliquer inutilement par l'augmentation du nombre des diaphragmes des tamis et des dispositifs de transport de la matière d'une chambre dans l'autre. Ce fractionnement d'ailleurs joue un rôle moins important dans la phase finale du broyage fin que dans celle du broyage préparatoire, où le point important consiste surtout à séparer le fin et à le transporter dans la chambre

suivante au fur et à mesure de sa production, puisqu'il forme un obstacle à la marche du broyage. Il s'ensuit que le fractionnement des opérations n'a d'importance que pour la première phase du broyage.

Les broyeurs compound résolvent le problème du broyage fin immédiat des matières dures chargées en fragments assez gros; ils présentent sur la méthode de broyage à l'aide des moulins intermédiaires et des broyeurs finisseurs l'avantage d'occuper moins de place, d'exiger des fondations plus simples, de coûter moins cher, de faciliter la conduite et la surveillance et enfin, d'exiger moins de force motrice à égalité de rendement.

Observations sur le tube broyeur

Quelque simple que paraisse la construction du tube broyeur simple ou conjugué, on a mis des années pour se rendre un compte exact de son mode de travail, et de la force motrice qu'il exige; pour en avoir l'explication exacte il a fallu procéder à des expériences particulières montrant l'intérieur du tambour pendant son fonctionnement. Ces deux points ont été élucidés, le premier par le Dr H. Fischer, le second par le Dr H. Dreyer (1), à la suite de longues expériences dans les usines. L'appareil dont on s'est servi à cet effet consiste en principe en un tube broyeur assez court dont le fond du côté de la sortie est remplacé par une toile métallique à grandes mailles. Ce broyeur tourne sur des galets de roulement à l'aide d'anneaux fixés sur la périphérie du tambour; il est actionné par un moteur électrique, ce qui permet de faire varier la vitesse au gré de l'opérateur. Si l'on remplit le tambour de la manière habituelle, c'est-à-dire à moitié environ, soit de boulets et d'une matière ne dégageant pas de poussière, on peut observer aisément la marche du broyage.

On fait tourner le broyeur à la main d'une quantité exactement suffisante pour faire prendre à la masse des corps broyeurs (boulets en acier) une position inclinée, de telle sorte qu'ils commencent à s'écrouler le long de la paroi. Si l'on continue à faire tourner le tambour à une vitesse lentement croissante, on remarque que la masse occupe une position de moins en moins serrée contre la paroi; tout d'abord les boulets roulent

(1) Dingler's, *Polytechn. Journal*, 1908.

avec assez de lenteur le long de la pente, puis ils accentuent leur mouvement pour décrire finalement une série de pistes complètes de broyage.

Plus on accélère le mouvement du broyeur, moins le mouvement des corps broyeurs devient perceptible. Les boulets se séparent et tombent le long de la paroi en couches distinctes, à travers lesquelles on peut voir une lumière placée sur l'autre côté du tambour. Si l'on augmente encore la vitesse, la masse cesse de se diviser et les boulets ne forment plus finalement contre la paroi qu'un anneau compact dans lequel on ne distingue plus aucun mouvement des boulets entre eux ou contre la paroi du tambour.

Les photographies ne reproduisent pas le mode de formation des couches aussi nettement qu'elles sont en réalité. L'image fait voir les boulets tels qu'ils sont placés momentanément au premier plan, elle ne permet pas de discerner ceux qui sont placés au second plan. L'impression visuelle est tout différente; l'œil retient mieux l'image des différents boulets, il suit nettement la piste et discerne aisément la séparation des différentes couches.

L'ascension des boulets avec la paroi du tambour sous forme d'une masse compacte, leur passage à l'état disséminé et la séparation des différentes couches ressortent avec netteté. Comme au moment de l'ascension on ne perçoit aucun mouvement entre les boulets et la paroi ou entre les boulets seuls, et que la faible diminution de vitesse dans la partie ascensionnelle de la piste ne peut guère produire d'effet utile, le broyage s'effectue en réalité par la chute de la masse sur le plan incliné.

Signalons encore pour être complet un résultat remarquable fourni par les premiers essais de broyage, à savoir la cause du cheminement de la matière à travers le tambour quoiqu'il soit placé sur un plan parfaitement horizontal. La matière, sur laquelle viennent tomber les boulets, se disperse dans toutes les directions Il s'ensuit que les points du tambour les plus chargés de matière en renvoient plus qu'ils n'en reçoivent des points où elle est moins abondante; mais, par suite de l'intensité de mouvement qui règne dans le tambour, les différences ne tardent pas à se compenser. Or, si la matière broyée peut quitter le tambour à l'une de ses extrémités, tandis qu'à l'autre arrive en

même temps de la matière fraîche, celle-ci est obligée de s'avancer à travers le broyeur, étant d'ailleurs soumise à l'action des boulets dont elle suit les mouvements.

L'introduction du tube broyeur a été pour l'industrie du ciment un puissant facteur de progrès, ce qui explique sa rapide diffusion. Mais, cette machine présente l'inconvénient d'absorber une force motrice considérable.

Vu le grand intérêt qui s'attache à cette machine, il n'est peut-être pas inutile de donner ici quelques indications pour le calcul de la dépense de force motrice qu'il exige ; ce calcul est d'ailleurs très simple. Si D désigne le diamètre (en mètres) du tambour broyeur en dedans du revêtement, Q le poids des corps broyeurs en kg. (boulets en acier ou galets de silex), la force motrice nécessaire sera :

Pour les tubes broyeurs chargés de galets de silex

$$N = 9{,}5 \frac{Q}{1.000} \sqrt{D} \text{ HP.}$$

Pour les tubes broyeurs chargés de boulets en acier

$$N = 8{,}2 \frac{Q}{1.000} \sqrt{D} \text{ HP.}$$

Nous terminerons cet aperçu sur le tube broyeur par quelques observations pratiques. Les matières soumises au broyage dans cette machine doivent être réduites au préalable à une finesse assez grande, elles contiennent généralement 50 à 60 % de poudre fine et doivent en contenir 70 à 85 % à la sortie du tube broyeur. Or, le broyeur préparateur fait un travail plus considérable que le tube broyeur, tout en exigeant moins de force motrice. On serait donc tenté de croire que le tube broyeur pourrait rendre plus qu'il ne rend. En effet, si l'on compare le poids des boulets ou des galets broyeurs avec le rendement fourni, on est obligé de convenir que celui-ci pourrait être meilleur. Mais, comme les matières soumises au broyage doivent séjourner longtemps dans le tube broyeur pour laisser aux boulets le temps de diviser finement les derniers granules, il est nécessaire, pour obtenir des rendements un peu élevés, d'employer des tubes longs et de fortes charges de boulets. Si l'on veut pousser le rendement au-delà de certaines limites en forçant l'alimentation, le refus sur le tamis à 5.000 mailles augmente rapidement; inversement, si l'on augmente la finesse du produit, le rendement quantita-

tif baisse de même. Il résulte d'expériences faites à ce sujet que si l'on veut réduire de 20 % à 10 % le refus sur le tamis à 5.000 mailles, le rendement du tube broyeur baisse de 50 %. Par conséquent, si pour une finesse donnant 20 % de refus sur le tamis à 5.000 mailles le rendement du broyeur n'est pas très favorable, il cessera d'être économique pour une finesse plus grande.

Broyeurs verticaux à boulets

Les broyeurs que nous allons décrire sont d'invention américaine. Ils sont préconisés comme broyeurs-finisseurs, et à ce titre nous les décrirons ici, bien que, en réalité, ils soient employés le plus souvent pour le broyage intermédiaire.

Les boulets en acier, tournant rapidement sur un plan horizontal, développent une force centrifuge considérable, capable de broyer les corps les plus durs. Ce principe a été appliqué pour la construction de broyeurs dans lesquels un certain nombre de boulets en acier forgé — généralement de 4 à 6 — sont entraînés par une couronne sur une piste concave où ils réduisent en poudre la matière interposée entre eux et la piste. Parmi les broyeurs horizontaux à boulets construits sur ce principe, nous ne retiendrons que le moulin de Fuller-Lehigh qui donne un produit contenant une grande proportion d'impalpable et dont les organes usés sont très faciles à remplacer.

La figure 40 fait ressortir les particularités de ce broyeur. L'arbre vertical *a*, actionné au moyen de la poulie *i* (ou encore directement au moyen d'un moteur électrique) est maintenu dans trois coussinets situés en dehors du moteur ; il porte la couronne d'entraînement *b* qui à l'aide de trois poussoirs *c* imprime un mouvement circulaire à quatre boulets *d* de 305 mm. de diamètre et pesant chacun 125 kg. ; ces boulets réduisent en poudre la matière qui vient tomber entre eux et la piste *e* placée dans la coquille *f*. Les corps broyeurs et la piste sont en fonte durcie, fabriquée d'après un procédé spécial. Des ailettes *g* fixées sur la couronne *b* agissent à l'instar d'un ventilateur et chassent la poudre fine à travers le tamis *k* qui, pour protéger le tissu métallique à mailles d'ailleurs assez grosses (250 mailles par cm²), est garni d'une tôle perforée en acier. La poudre fine, qui se réunit dans l'espace extérieur du moulin, est amenée vers l'ouver-

ture de sortie B par un ramasseur *l*, tandis que la matière insuffisamment broyée retombe dans la chambre de broyage. Pour régler l'alimentation en A, on peut modifier la vitesse de la vis d'introduction à l'aide de cônes étagés.

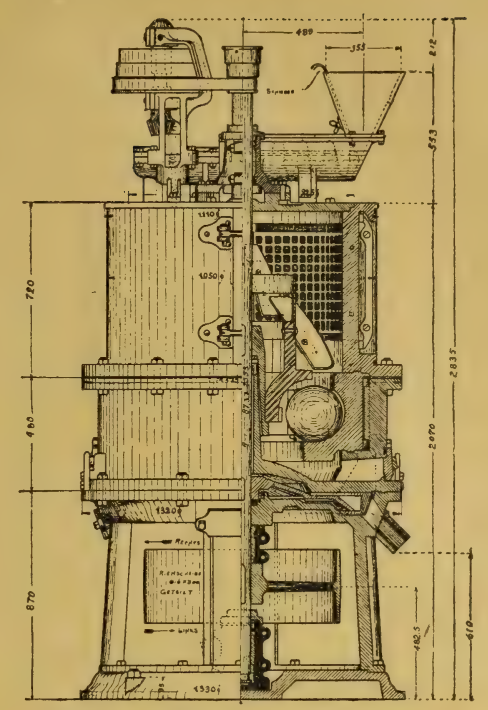


Fig. 40. — Broyeur Füller-Lehigh

Le broyeur Füller-Lehigh convient aussi bien pour le broyage des matières très dures que pour celui des matières très tendres. Un broyeur de grand modèle de ce système installé à la fabrique de ciment Goschwitz produit par heure 7.000 kg. de poudre brute donnant 12 % de refus sur le tamis à 5.000 mailles avec une force motrice de 67 chx. Ajoutons que le broyeur Füller-Lehigh, grand modèle, est également utilisé pour le broyage intermédiaire (sans tamis ni ventilateurs) des matières premières et des clinkers. Une installation de ce genre, pour une production de 3.000 barils de ciment par jour comprend 2 broyeurs pour le broyage intermédiaire et 10 broyeurs pour la mouture fine. Il convient de faire remarquer le faible encombrement de ces machines par rapport à leur rendement.

BROYEURS A MARCHE RAPIDE

Pendant que les constructeurs allemands s'efforçaient de perfectionner les broyeurs à marche lente, les Américains dotaient l'industrie de certains types de broyeurs absolument nouveaux qui furent successivement adoptés par de nombreuses usines du nouveau monde. Ce succès est dû en grande partie aux soins ju-

dicieux apportés par les ingénieurs dans le choix des métaux destinés à la construction des organes broyeurs ; car la haute résistance de l'acier employé à la confection des cylindres et des anneaux broyeurs est le seul facteur qui explique et justifie le succès des machines américaines. On est heureux de constater ce changement dans les mœurs des industriels du nouveau monde qui, il n'y a pas très longtemps encore, nous inondaient de machines séduisantes par leur aspect et la simplicité de leur fonctionnement, mais dont les organes se brisaient comme du verre au bout de huit jours de service.

Parmi les moulins à marche rapide, il y a lieu de citer tout d'abord les *moulins à pendule*, dans lesquels le broyage est effectué au moyen de meuletons coniques suspendus à des tiges et qui, utilisant la force centrifuge qui leur est imprimée, exécutent un mouvement de rotation rapide dans un anneau-mortier et broient les matières interposées entre eux et la paroi de la cuve. Le principe sur lequel sont basés ces sortes de broyeurs a été appliqué depuis longtemps pour le broyage des minerais, mais ce n'est que depuis 1890 environ que Griffin l'a appliqué dans l'industrie du ciment.

Le broyeur Griffin, dont la figure 41 montre tous les détails, se compose du pendule 1, du cylindre broyeur 31 qui est fixé dessus, et qui est mis en mouvement par la poulie de commande 17. La force est transmise par celle-ci au moyen d'un joint universel 9, dont les pivots se meuvent dans des coulisseaux qui exécutent un mouvement de glissement vertical contre le moyeu de la poulie 16. Dans la cuve 24 est fixé l'anneau-mortier 70 sur lequel tourne le cylindre-broyeur ; c'est à l'aide de ces deux organes que s'effectue le broyage. La plaque de fondation est munie de fentes par lesquelles la matière, chassée à travers le tamis vertical par les les ailettes 6, tombe dans un réservoir sous-jacent d'où elle est enlevée par un système de transport. La matière est remuée par des heurtoirs disposés à la partie inférieure du disque broyeur. L'alimentation se fait à l'aide de la trémie 50 et de la vis 49 mue par une poulie 41 munie d'un disque à étage 40 et par un jeu d'engrenages (60-61). La poulie de commande 19 tourne dans une boîte 20 qui repose sur les supports 5 du moulin.

L'huile de graissage est distribuée aux différents organe de la machine au moyen du pivot perforé 12.

Le support de la machine se compose de montants en bois qui reposent dans des patins 66 fixés par des boulons qui pénètrent dans la plaque de fondation 24. Entre les patins et la plaque sont intercalés des

coussinets en caoutchouc destinés à donner de l'élasticité aux montatnts en bois. A la partie supérieure les montants sont fixés au support par des flasques en forme d'U. Pour maintenir les montants en bois dans leur position exacte, on les a consolidés par quatre montants en fer qui partent des quatre coins de la plaque de fondation, et qui sont fixés d'une part au collier-support 4 et de l'autre à la plaque de fondation.

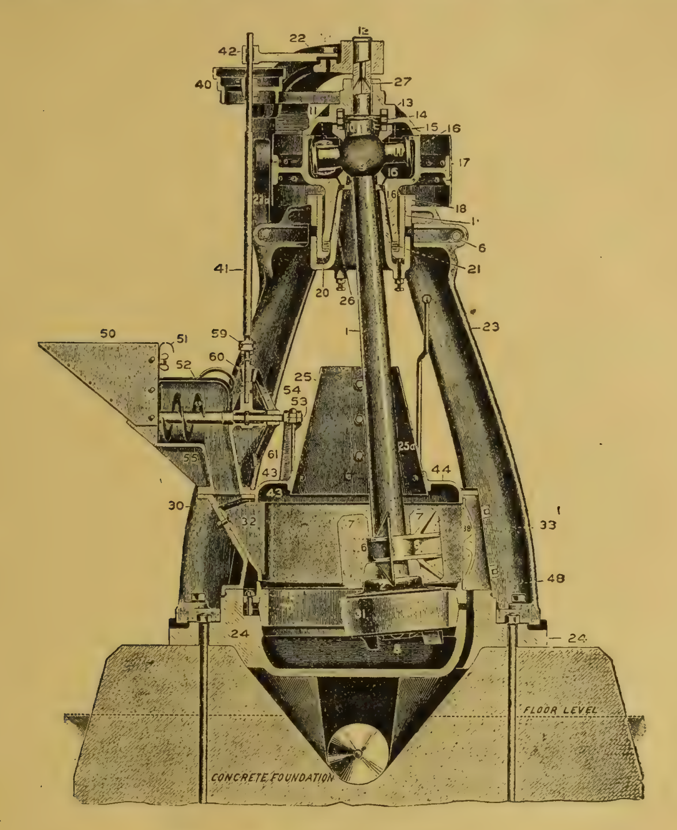


Fig. 41. — Broyeur à pendule, de Griffin. Appareil ouvert

Ce mode de connexion de la plaque et de la partie supérieure a pour but de diminuer autant que possible la répercussion sur la plaque de fondation, des chocs et des ébranlements qui résultent du fonctionnement de la machine, et d'éviter la rupture des montants et de la plaque de fondation, ce qui arrive parfois.

Comme on le voit par cette description, la construction et le mode d'action du broyeur Griffin sont des exemples uniques du genre. Qu'on se représente un poids suspendu par un fil à l'axe d'un cercle et tournant contre le bord intérieur de ce cercle. Si

l'on imprime au fil un mouvement tournant, le poids a une tendance à dévier de la verticale, et si l'on accélère le mouvement de manière à ce que le poids tourne le long du bord du cercle, il s'établit entre le poids et le cercle une pression dont l'importance dépend de la rapidité de rotation du fil. Telle est la figure schématique du broyeur Griffin : les doigts qui tiennent le fil représentent les organes moteurs de la machine, le fil figure la tige du pendule, le poids l'organe broyeur et l'anneau le mortier.

Dans le broyeur normal de Griffin, la pression exercée par le pendule sur l'anneau broyeur est d'environ 3.000 kg. Cette pression cependant dépend de la vitesse de rotation de la tige du pendule et du poids de ce dernier. Par conséquent, plus on augmente le nombre de tours et le poids du pendule, plus la pression augmente, et par conséquent aussi le broyage.

Disons un mot de la contradiction apparente qu'on observe dans ce broyeur. Si l'on fait tourner dans le sens de l'aiguille d'une montre la poulie supérieure de commande et la tige du pendule qui y est suspendue, le pendule tournera autour du mortier dans le sens inverse, et cela beaucoup plus rapidement que la poulie. Pour comprendre ce mouvement contraire du pendule autour du mortier, qu'on se figure l'anneau broyeur et le pendule munis de dents d'engrenages qui, dans la pratique, sont remplacées par le mouvement à friction. Une poulie qui roule sur une surface concave a une tendance à rétrograder en quelque sorte. Dans le broyeur la tige du pendule, étant fixée dans la poulie, conserve le mouvement initial qui lui est imprimé, mais le meuleton qui y est suspendu roule dans un sens opposé sur l'anneau broyeur, et l'on serait tenté de croire que la tige du pendule obéit au même mouvement.

Le rendement horaire du broyeur Griffin en ciment fin est assez variable : d'après les uns il serait d'environ 2.000 kg donnant 1-2 % de refus sur le tamis à 900 mailles, d'après d'autres il serait de 1.680 kg avec un refus de 1,5 % sur le même tamis et de 22,4 % sur le tamis à 5.000 mailles. La dépense de force motrice varierait également entre 21 et 34 chevaux.

Ce genre de construction présente un côté faible : celui-ci consiste dans l'action défavorable de la force centrifuge non compensée par le pendule unique, qui malgré l'interposition de

corps élastique dans les parties portantes, ne peut jamais être supprimée complètement. Pour éviter cet inconvénient, la Bradley Pulverizer Company construit un *moulin à trois meuletons* ou galets broyeurs, représenté par la figure 42, suspendus à des battants actionnés par courroie demi-croisée, à l'aide d'une poulie verticale et d'une poulie d'entraînement qui renferme les boîtes de suspension des battants ; les pilons, entraînés par la force centrifuge, effectuent le broyage fin de la matière qui se trouve placée entre eux et l'anneau broyeur. Un fort

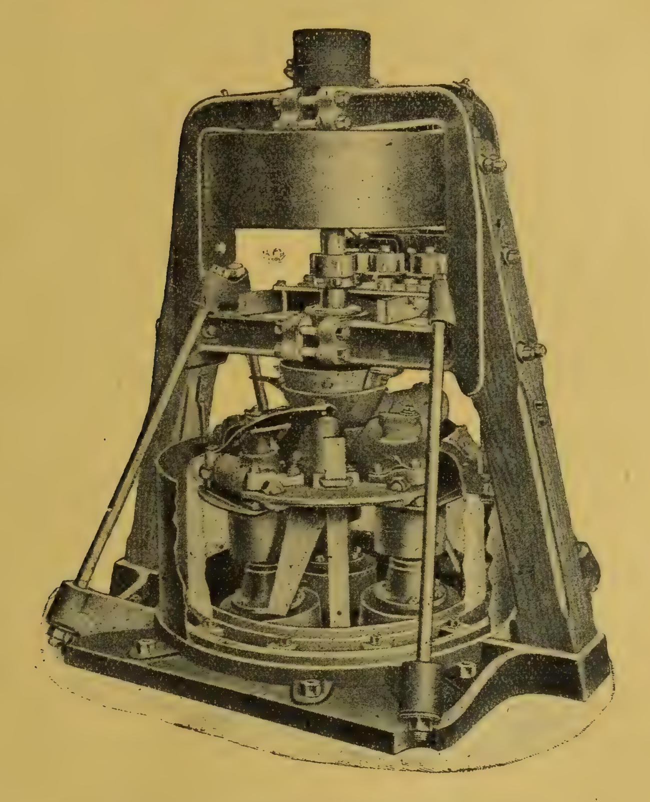


Fig. 42. — Broyeur à 3 pendules, ouvert

courant d'air produit par la rotation rapide des galets chasse le fin à travers les mailles d'un tamis vertical qui entoure la chambre de broyage. Des dispositions spéciales ont été prises pour éliminer la poussière soulevée par le broyage, pour protéger la

machine contre les ébranlements résultant de la force centrifuge et du poids de la masse, et enfin pour assurer le graissage constant des coussinets et de la crapaudine de l'arbre central. Les constructeurs se sont naturellement inspirés de l'expérience acquise avec les moulins Griffin, ce que fait voir d'ailleurs l'extérieur du broyeur et l'emploi de supports en bois à jeu élastique, exactement comme dans le broyeur à un seul pendule. En outre, les galets broyeurs sont disposés de manière à ce qu'ils aient une tendance à se soulever, afin de soulager la piste de leur poids, à décharger les organes moteurs et à diminuer en partie la pression qu'ils exercent sur le fond de la cuve.

Les rendements indiqués du broyeur à trois meuletons sont de 3.500 kg par heure dans le broyage des matières premières du ciment, 3.000 kg par heure dans le broyage de clinker cuit dans les fours verticaux. 2.150 kg par heure dans le broyage de clinker cuit dans les fours rotatifs. Lorsqu'il est combiné avec un système de tamisage, les rendements s'élèveraient à : 4.500-5.000 kg par heure dans le broyage des matières premières du ciment, 4.000-4.500 kg par heure dans le broyage de clinker cuit dans les fours verticaux, 2.900-3.500 kg par heure dans le broyage de clinker cuit dans les fours rotatifs.

Dans tous les cas ci-dessus la dépense de force motrice indiquée est de 40 chevaux ; en admettant que ces chiffres soient confirmés par des essais loyalement exécutés, le rapport entre la force motrice dépensée et le rendement du broyeur à trois galets serait assez favorable. — Nous avons donné la description des moulins à pendule simplement à titre de document, car malgré ce qu'ils peuvent avoir de séduisant au premier abord, ils présentent de graves inconvénients qui leur ont fermé l'accès de la plupart des usines d'Europe : ils entraînent d'énormes frais de réparation et leur fonctionnement ne paraît pas présenter toute la sécurité qu'on exige actuellement de ces sortes de machines.

Broyeur (finisseur) à anneau. — Ce broyeur (fig. 43) appartient à la même catégorie que les broyeurs horizontaux décrits ci-dessus. Dans ce broyeur le travail de mouture s'effectue, non entre les cylindres broyeurs, mais entre ceux-ci et un anneau broyeur qui tourne sur les cylindres et contre lequel ceux-ci sont pressés par des ressorts. Des trois cylindres un seul est actionné, il en-

traîne l'anneau par friction et celui-ci à son tour actionne les deux autres cylindres égalcment par friction. Les matières introduites dans le moulin tombent dans l'espace compris entre un des cylindres et l'anneau, elles sont retenues contre ce der-

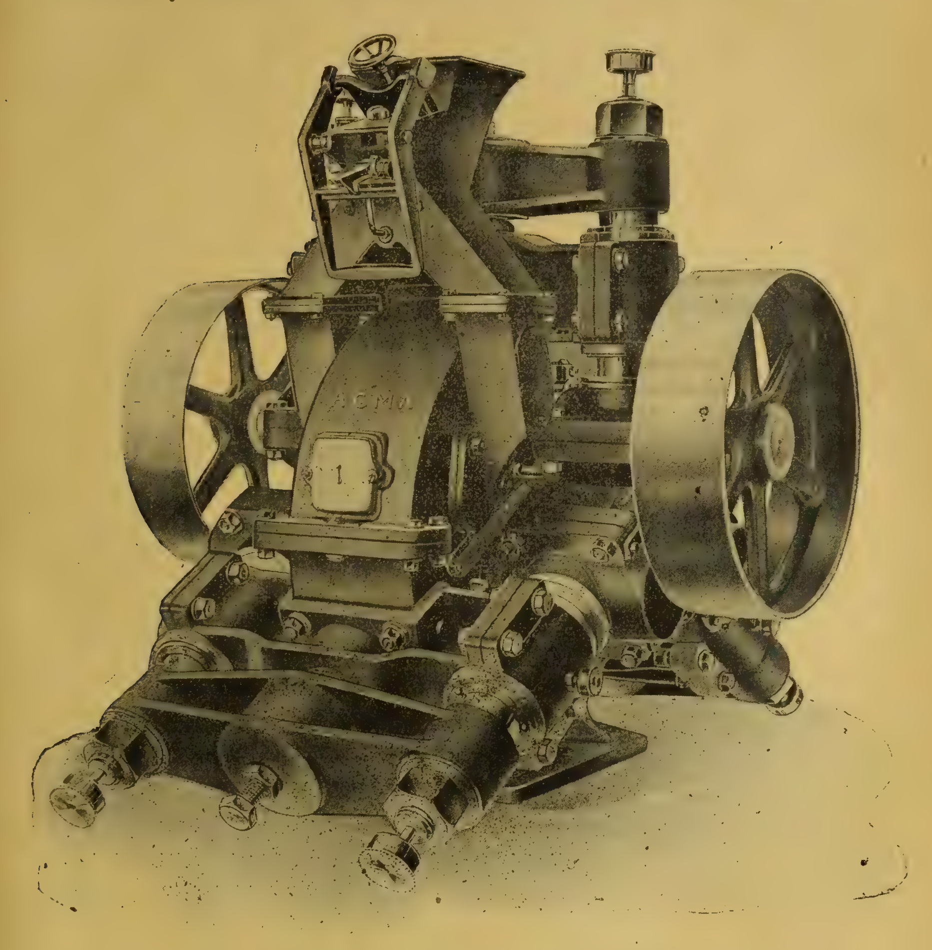


FIG. 43. — Broyeur à anneau, des Ateliers d'Arlod

nier par la force centrifuge (les cylindres ont une surface convexe, l'anneau une surface concave), ensuite elles passent entre les deux autres cylindres et sont broyés plus ou moins énergiquement suivant la tension des ressorts des cylindres; enfin, elles sont déversées par dessus les bords de l'anneau broyeur,

tombent dans la cage qui l'entoure et sortent par son ouverture inférieure.

Comme l'anneau broyeur est porté librement par les trois cylindres et participe, par conséquent, au jeu qu'ils développent dans leur mouvement, il supporte très bien les chocs qui peuvent se produire en cours de broyage; il s'ensuit que le moulin

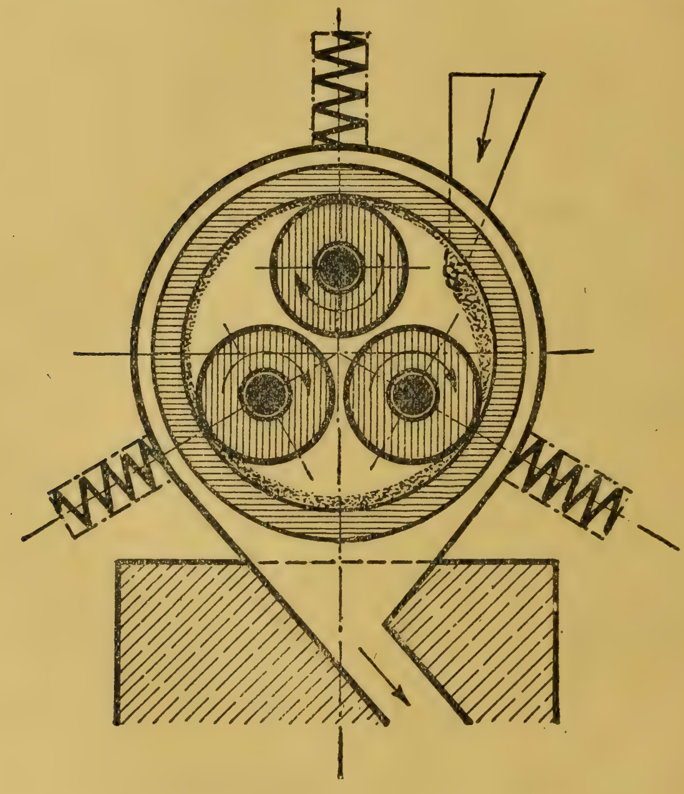


Fig. 44. — Broyeur à anneau des Ateliers d'Arlod. Coupe

travaille presque sans chocs et sans bruit. C'est pourquoi ce moulin n'exige presque pas de fondations et rien ne s'oppose à son installation dans les étages supérieurs de l'atelier de mouture, pourvu que le plancher soit assez solide pour supporter le poids de la machine.

Ce broyeur ne donne pas par lui-même un produit achevé; il doit être complété par un système spécial de blutage (tamis ou séparateur à air); de même il exige, tout comme les mou-

lins Bradley, que la matière soit préalablement réduite à une certaine finesse. Par contre, l'humidité de la matière mise en œuvre ne présente aucun inconvénient. Quoique ce moulin soit plus spécialement employé comme broyeur-finisseur, il peut servir également au broyage intermédiaire des matières. Son rendement est de 2 à 3.000 kg. de matière de finesse normale par heure, et la dépense de force motrice de 35 chx.

Moulin Ring Roll, système Sturtevant. — Ce moulin se compose également d'un anneau enclume et de trois rouleaux broyeurs. L'anneau est fixé dans une tête supportée par un arbre horizontal qui lui imprime un mouvement rotatif; il entraîne les rouleaux broyeurs qui, étant à monture élastique, pressent contre sa face intérieure avec une force considérable. L'anneau est concave, les rouleaux sont convexes. Ceux-ci roulent sur la face intérieure de l'anneau, non par contact direct, mais par l'intermédiaire de la matière. Celle-ci, étant amenée par la trémie d'alimentation à la face inférieure de l'anneau, y est maintenue par l'action de la force centrifuge et subit ensuite le broyage au fur et à mesure qu'elle est entraînée sous les rouleaux.

Les rouleaux tournent librement sur leurs axes qui sont noyés dans un bain d'huile; leurs efforts de pression sont parfaitement équilibrés et ils travaillent sans chocs et sans ébranlements. Chaque axe est maintenu dans la serrure puissante des attaches d'acier de son levier coudé. Les montures des rouleaux sont appliquées sur la porte massive qui ferme la paroi antérieure du bâti de la machine : pour les retirer de l'anneau, il suffit d'ouvrir la porte, qui tourne sur ses charnières. Cette disposition, d'une simplicité géniale, facilite considérablement la visite de l'intérieur de la machine ainsi que les réparations. Chaque rouleau peut être enlevé et remplacé en quelques minutes, parce qu'on n'a besoin pour cela de démouler aucun axe.

Pendant le fonctionnement, la face concave de l'anneau tournant est constamment recouverte d'une couche épaisse de matière. Les faces des rouleaux ne rencontrent jamais une piste nue, ceux-ci ne viennent donc jamais en contact direct avec l'anneau, mais seulement par le moyen de la matière interposée. Il s'ensuit que l'anneau n'a qu'une usure très faible : il peut fonctionner parfois pendant deux et même quatre ans avant d'être remplacé. Il en est de même des rouleaux, même lorsque les ma-

tières soumises au broyage sont très dures, comme par exemple les clinkers de ciment.

Comme le moulin est alimenté sans interruption de matière brute, il y a également une évacuation continue de matière broyée retombant des deux côtés de l'anneau. Le produit se rend par la partie inférieure de l'enveloppe dans la cuvette d'un élévateur, de là elle est élevée dans un séparateur Sturtevant Newaygo qui sépare le produit fin, tandis que le refus du tamis retourne dans le moulin où il subit un nouveau broyage ensemble avec la matière brute.

BLUTAGE

Il est rare que les moulins soient agencés de manière à fournir directement un produit achevé, et il est de règle de soumettre la matière à un blutage soigné afin de séparer le fin et de l'approprier à la suite des opérations tandis que le refus des tamis retourne aux moulins pour subir un nouveau broyage.

Les systèmes de blutage usités dans les fabriques de ciment sont au nombre de trois, savoir :

a) Les tamis hexagonaux et cylindriques ;

b) Les tamis à secousses ;

c) Le séparateur à air et le sélecteur.

Les *tamis hexagonaux* ou *cylindriques*, malgré leurs inconvénients, sont encore utilisés dans certaines usines, sans doute à cause de leur bon marché comparativement à leur rendement. Mais, les tissus de ces sortes de tamis sont sujets à une usure rapide, surtout lorsque les matières à bluter attaquent les tissus ; par suite, ils se déchirent souvent et laissent passer la matière non blutée. Ces inconvénients sont inséparables des blutoirs cylindriques. Le blutoir hexagonal se compose d'un axe horizontal faiblement incliné, muni de bras ou croisillons servant à supporter les cadres en bois interchangeables sur lesquels sont montés les tissus (le plus souvent en acier, plus rarement en laiton). Le bâti est en bois ou en tôle ; il supporte le coussinet de l'arbre du blutoir et, en cas de besoin, ceux de la poulie de commande lorsque le mouvement est transmis par engrenages coniques. La partie du bâti rétrécie vers le bas forme une auge dans laquelle tourne l'hélice qui transporte la matière blutée vers l'ouverture de vidange, tandis que le refus est éliminé par une autre ouver-

ture. Il est recommandable, dans certains cas, de protéger le tamis fin extérieur contre une usure trop rapide par un cylindre intérieur en forte tôle perforée de trous moins fins. Le nettoyage des tamis se fait par batteurs mécaniques agissant soit sur les cadres, soit sur l'arbre, et produisant un léger ébranlement périodique de tout le système contenu dans le cadre.

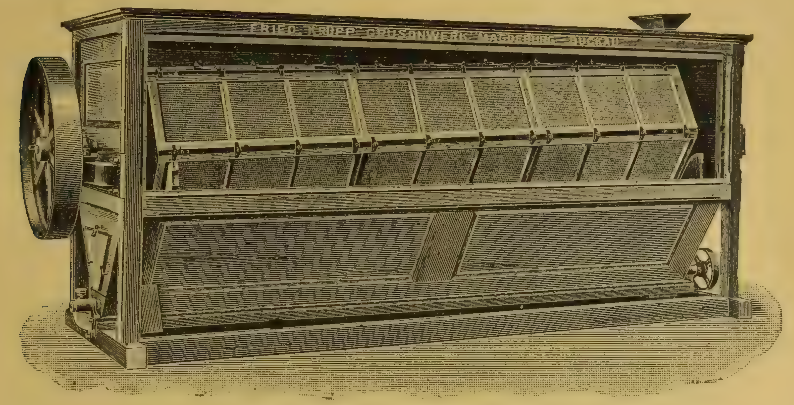


FIG. 45. — Tamis hexagonal

Un blutoir hexagonal de 1 m. de diamètre et 3 m. de longueur de cadre donne un rendement d'environ 1.000 kg de matière à l'heure avec 1-2 % de refus sur tamis de 900 mailles, et 18 à 20 % de refus sur tamis 5.000 mailles ; un blutoir de 4 m. de longueur de cadre rend environ 1.350 kg à l'heure. Force motrice 1/2 à 3/4 de cheval.

Lorsque les tissus sont fixés sur des cadres cylindriques, le blutoir est *cylindrique*. Celui-ci présente sur le blutoir hexagonal l'avantage de se nettoyer automatiquement si on le munit d'un système de brosse de même forme ; mais cette brosse a l'inconvénient de hâter l'usure des tamis.

Le *tamis à secousses* n'est autre chose qu'un plan incliné recouvert d'un tamis, dont l'inclinaison peut être réglée au moyen d'une vis et d'une roue à main. Dans sa position verticale le blutoir cesse de fonctionner, n'offrant aucune prise à la matière ; dans sa position horizontale il fonctionne à l'instar d'un tamis ordinaire, la grosseur des grains qui le traversent étant limitée par la section des mailles. Entre ces deux positions extrêmes, on peut se représenter toutes les positions intermédiaires dans les-

quelles la grosseur maxima des granules est plus petite que la section des mailles du tamis, et d'autant plus petite que la position du blutoir se rapproche davantage de la verticale. Dans ces conditions, on peut obtenir un blutage fin avec un tamis à mailles de section relativement grande.

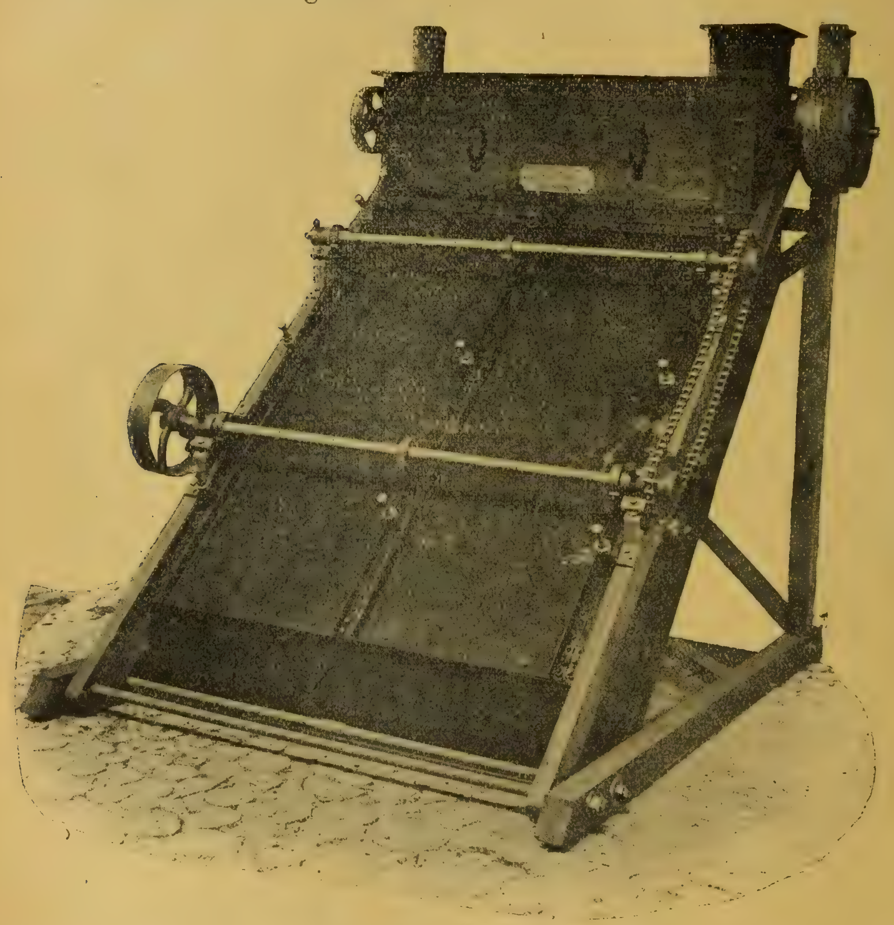


Fig. 46. — Tamis incliné, des Ateliers d'Arlod

L'efficacité du tamis est augmentée, en outre, par l'action d'un système de battage dont les coups se succédant à des intervalles très rapprochés, ébranlent le blutoir. La fréquence du battage peut être fixée à volonté a l'aide d'un régulateur ; son action est naturellement le plus énergique au point de contact, mais elle di-

minue à mesure qu'on s'en éloigne et devient nulle au point d'appui de l'appareil.

Une application ingénieuse du tamis à secousses a été faite par les Ateliers d'Arlod en combinaison avec le séparateur à air. Nous allons la décrire brièvement.

Tamis séparateur des Ateliers d'Arlod (fig. 46). — C'est un tamis incliné, enfermé dans un châssis étanche en acier, et muni d'un sytème de batteurs. On fait varier à volonté la finesse du produit en réglant en conséquence l'inclinaison de la surface tamisante.

Le tamis est alimenté par l'élévateur qui déverse la matière dans une trémie d'où elle est reprise par une vis sans fin qui la distribue d'une façon régulière et uniforme sur toute la surface tamisante. La matière s'y répand en cascade et passe par les mailles avec une rapidité étonnante ; le refus est évacué par le bas et retourne dans le broyeur.

Une porte de contrôle placée derrière la gaîne de l'alimentateur permet de surveiller et au besoin de régler la distribution. Le châssis du tamis est en acier ; il est supporté par des ressorts et se règle automatiquement. La toile est maintenue en tension normale et uniforme également au moyen de ressorts, et c'est là un point important pour la régularité des vibrations. Celles-ci sont produites par un mécanisme très simple, elles se succèdent en mouvements rapides et secs, quoique avec un amplitude très faible : elles maintiennent le tamis propre et empêchent toute obstruction. Le système comporte un, deux ou trois tamis, suivant l'importance du travail.

Ce tamis donne un rendement très élevé, qui varie d'ailleurs suivant la nature des matières traitées et suivant leur teneur en produit fin. Il n'exige que très peu de force motrice : celle d'un cheval est plus que suffisante pour actionner le tamis le plus grand.

BROYEUR COMBINÉ AVEC LE SÉPARATEUR A AIR

Parmi les appareils broyeurs que nous avons décrits plus haut, le broyeur à boulets, malgré son insuffisance dans les cas ordinaires, n'en constitue pas moins un des plus intéressants par son originalité même et par sa grande puissance de travail. Mais son rendement est limité par suite du tamisage simultané de la matière soumise au broyage ; il diminue proportionnellement à la finesse des tamis dont la surface est d'ailleurs toujours trop fai-

ble par rapport au travail du moulin. En outre, si l'on surcharge ce dernier, la matière traitée pénètre dans les cavités des tamis avant d'être réduite à la finesse voulue : elle est alors gênante pour le tamisage aussi bien que pour le travail normal de mouture.

Mais, les conditions changent du tout au tout si l'on tamise la farine séparément. Il n'y a plus alors d'obstacle à l'agrandissement de cet appareil et on arrive à des résultats étonnants. Ce progrès a été réalisé par Pfeiffer frères. En combinant le moulin à boulets avec un séparateur à air, ils ont réussi à créer un système de mouture d'une grande simplicité et à augmenter considérablement l'effet utile du moulin.

La construction de l'appareil diffère de celle du broyeur à boulets décrit plus haut par les détails suivants : les gradins de mouture sont relativement étroits, ils sont chacun d'une seule pièce en acier fondu au creuset, ils n'ont ni fentes, ni orifices d'aucune sorte qui seraient de nature à les affaiblir. Par suite, ils conservent leur résistance mécanique jusqu'au dernier degré d'usure. Il n'y a pas à craindre avec cet appareil que les boulets bouchent les orifices d'échappement ; de même on n'a besoin d'agrandir ni de rouvrir ces orifices à l'aide d'une goupille. La bonne construction des plaques triturantes et la qualité de l'acier employé les rendent presque inusables. Les élévations d'un gradin à l'autre sont pourvues d'orifices qui donnent issue aux matières suffisamment broyées. Ces orifices sont réglables du dehors, ils peuvent être rétrécis ou élargis suivant les besoins.

Comme pour le moulin ordinaire à boulets, le revêtement en tôle qui entoure le tambour se termine à sa partie inférieure par une trémie; celle-ci recueille la matière broyée et l'amène à un élévateur à godets qui la conduit à un séparateur à air placé au-dessus du moulin. Dans ce séparateur à air ou sélecteur, la farine fine est séparée des grains au moyen d'un courant d'air produit dans l'appareil même et y circulant. L'appareil n'a que trois orifices, celui d'entrée et ceux de sortie pour les sablettes et pour la farine; il n'exige ni tamis, ni chambre à poussière, ni appareil auxiliaire d'aucune sorte.

Le séparateur est représenté en coupe par la figure 47. L'appareil est construit en tôle d'acier et se compose d'une enveloppe cylindrique avec cône extérieur et cône intérieur disposé à une cer-

taine distance du premier. Le ventilateur *g* est actionné par l'arbre *f*; sur le même arbre, en-dessous du ventilateur, se trouvent les plateaux *b* et *d* qui reçoivent la matière de l'entonnoir d'alimentation *a*. Par suite de la rotation, les distributeurs y projettent la matière dans toutes les directions, et le courant d'air produit par le ventilateur la traverse de bas en haut. La force du courant d'air enlève les fines particules et les entraîne à travers

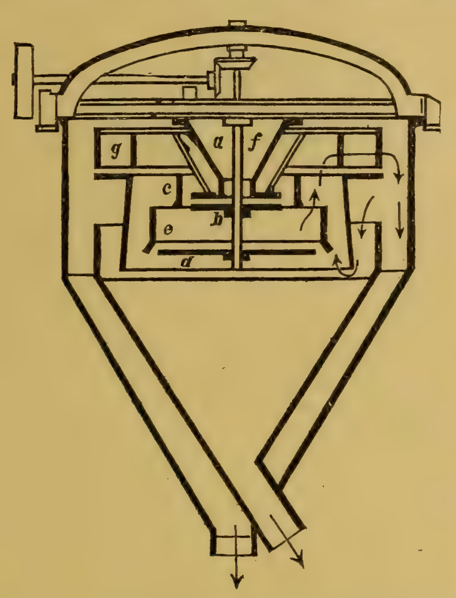


Fig. 47. — Séparateur à air. Vue schématique

le ventilateur en les projetant contre la paroi extérieure, d'où elles tombent dans le cône extérieur et sortent par l'ouverture centrale. Les gros grains contenus dans la matière, qui ont traversé le courant d'air sans avoir été entraînés, tombent dans le cône intérieur et sortent par le tuyau latéral, pour repasser au broyeur s'il y a lieu. L'air retourne naturellement à l'espace qui se trouve au-dessous du distributeur, de sorte que le séparateur travaille constamment avec la même quantité d'air et qu'il ne s'en dégage pas de poussière. Les tiges avec goupilles, visibles sur le couvercle du séparateur, servent à faire monter ou descendre l'obturateur annulaire qui règle la finesse de la matière. La force du courant d'air diminue dans la mesure où l'on fait monter l'obturateur; par ce moyen très simple on arrive à obtenir une finesse

quelconque. Une fois réglé, l'appareil fonctionne sans interruption et sans surveillance et donne toujours un produit très uniforme. La farine peut être ensachée directement ou transportée dans les silos, etc., tandis que les grains retournent au moulin pour continuer à y être broyés.

Le modèle de séparateur que nous venons de décrire permet d'obtenir de la farine d'une finesse correspondant à environ 15 % de refus sur le tamis à 5.000 mailles. La maison Pfeiffer frères le

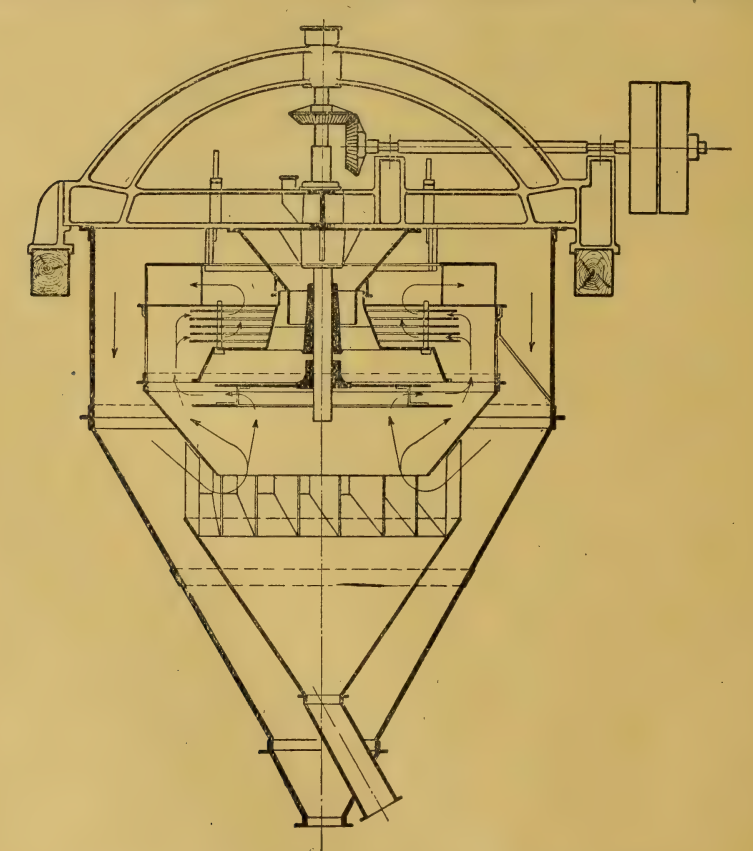


Fig. 48. — Vue schématique du sélecteur, des Ateliers d'Arlod

construit en six grandeurs différentes donnant un rendement horaire de 500 à 12.000 kg. par appareil, avec une dépense de force motrice de 1/4 de cheval à 4 chevaux. Pour obtenir une finesse encore plus grande on remplace le séparateur par le sélecteur.

Sélecteur. — Le sélecteur ressemble au séparateur normal par

son aspect extérieur; mais il en diffère par un grand nombre de particularités, notamment par les plateaux tamiseurs représentés par la figure 48. Ces plateaux sont superposés à de faibles distances les uns des autres, de telle sorte que le courant d'air est obligé de les traverser en passant de l'espace où il se sature des matières à l'espace où il s'en dépouille. Les plateaux sont en communication avec le ventilateur et avec le dispositif d'éparpillement, et participent à leur mouvement de rotation. Le courant d'air ascendant qui circule dans le sens des flèches est décomposé par les plateaux distributeurs en un grand nombre de tranches ou rayons très minces. Il est clair qu'en passant à travers les espaces horizontaux, la matière de chaque tamisage laisse tomber les particules les plus lourdes qu'elle a entraînées. Celles-ci viennent ainsi en contact avec les plateaux tournant d'un mouvement rapide, sont projetés par la force centrifuge au dehors où le courant d'air a moins de force et tombent alors dans le conduit à gruau. Les particules les plus fines sont, au contraire, soustraites à l'action de la force centrifuge, et déversées par les plateaux dans le conduit à poussière.

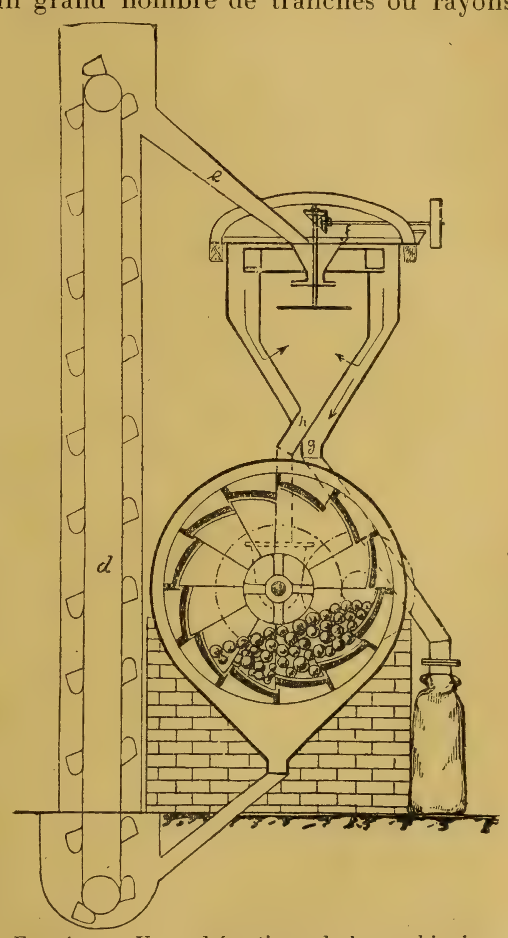


Fig. 49. — Vue schématique de la combinaison du séparateur ou du sélecteur avec le broyeur

Cet appareil sépare sans aucune difficulté les farines les plus

fines, impalpables, avec un refus de 0,5 % sur le tamis à 5.000 mailles et de 0 % sur le tamis à 900 mailles; il a une grande puissance de travail, il n'est pas influencé par un certain degré d'humidité et peut être combiné avec n'importe quel broyeur. Son adjonction à d'anciennes installations a permis d'augmenter leur rendement de 30 à 50 %. Sa construction et son mode de fonctionnement peuvent être expliqués par le schéma de la figure 48.

Le séparateur, aussi bien que le sélecteur, peut être facilement réglé pour n'importe quelle finesse à obtenir. Ces appareils travaillent d'une manière plus sûre et plus parfaite que les tamis dont ils n'ont ni les défauts ni les inconvénients ; aussi fonctionnent-ils à plus d'un millier d'exemplaires dans les fabriques de chaux et de ciment. Ce succès est dû en partie à la facilité avec laquelle ils peuvent être combinés avec n'importe quel broyeur des anciennes installations, qui s'en trouvent ainsi rajeunies. Ils fournissent le moyen d'éliminer rapidement du broyeur la matière moulue pour faire place à de la matière neuve ; il s'ensuit qu'on peut obtenir, à l'aide d'un seul broyeur, une farine très fine tout en augmentant son rendement normal.

Les Ateliers d'Arlod combinent le tamis à secousses avec le sélecteur, dont le travail se trouve ainsi facilité et renforcé.

Observations sur l'emploi du séparateur à air. — Son application dans un cas difficile

On a objecté qu'il serait impossible d'obtenir les matières premières à l'état de mélange upniforme en se servant des broyeurs combinés avec le séparateur à air. Cette manière de voir est le fait d'un préjugé, d'un manque de réflexion ou de l'oubli des principes de la théorie; elle ne résiste ni à la saine critique, ni aux résultats fournis par la pratique industrielle. Dans son récent ouvrage, R. Meade, le fabricant de ciment américain bien connu, s'élève énergiquement contre la fausseté de cette opinion ; il s'exprime comme suit :

« La question du séparateur à air a fait l'objet, il y a un an, d'une description tendancieuse dans le journal *Engineering Magazine ;* son auteur prétendait que les séparateurs avaient pour effet de détruire l'homogénéité du produit et que dans un mélange d'argile et de pierre calcaire par exemple, les particules plus

légères de l'argile étaient séparées d'avec celles du calcaire. L'auteur de cet article paraît avoir perdu de vue que si les particules de calcaire étaient broyées un peu plus finement, elles seraient également entraînées par le courant d'air, de sorte que, en supposant même que dans la mise en route d'un séparateur le premier produit obtenu fût un peu trop riche en argile, cet inconvénient disparaitrait par le retour du gruau calcaire dans le broyeur pour y être soumis à un nouveau broyage. Dans ce cas, en effet, les particules de calcaire, en repassant dans le séparateur, sont séparées en même temps que l'argile de la nouvelle charge de matières mélangées. Les expériences que j'ai faites personnellement avec les séparateurs à la fabrique de l'*Edison Portland Cement Company* m'ont amplement démontré que le prétendu manque d'uniformité du produit ne saurait être invoqué contre l'emploi du séparateur à air. »

Après s'être rendu compte par des expériences approfondies de la justesse de l'opinion que nous venons de citer, le Dr E. Bogdahn s'est décidé à installer des broyeurs à boulets, munis de séparateurs à air ; ces appareils fonctionnent depuis bientôt huit ans. Les matières premières qu'il emploie sont du calcaire dur à environ 98 % de carbonate de chaux et de l'argie plastique à environ 1?-17 % de $CaCO^3$. Les conditions d'exploitation de la carrière sont telles qu'aucun triage n'y est possible. En général, l'argile seule est soumise à la dessiccation dans un séchoir à tambour chauffé par les gaz de la combustion du four rotatif, tandis que la pierre calcaire est utilisée en l'état où elle se trouve et n'a besoin d'être séchée que lorsque le temps est très humide.

L'argile, après dessiccation, se présente sous forme d'une masse composée de poudre fine mélangée de quelques granules très friables, tandis que le calcaire est très dur et tenace. Ces matières premières sont donc des plus ingrates ; les résultats que le Dr Bogdahn en obtient n'en sont que plus intéressants, et cependant ils sont inférieurs à ceux obtenus dans la plupart des autres fabriques qui se servent des mêmes appareils.

La marche des opérations est la suivante : Les matières premières, à l'état de mélange composé de 100 kg de pierre calcaire et de 37 kg d'argile, sont introduites dans le broyeur à boulets à l'aide d'un chargeur automatique breveté de Maus ; elles y sont broyées jusqu'à une certaine finesse et déversées ensuite par

l'élévateur dans le séparateur à air breveté. Celui-ci sépare le fin du gros, et les sablettes retombent dans le broyeur où elles subissent un nouveau broyage en même temps que les matières fraîches. Cette circulation se continue d'une manière ininterrompue jusqu'à ce que toute la matière soit réduite à la finesse voulue. Comme la composition de l'argile varie aux environs de 14 %. on doit trouver théoriquement aussi des variations dans la farine fine achevée.

Nous donnons dans le tableau suivant les résultats fournis par l'analyse de 4 couches différentes, soit environ une analyse par heure :

1re COUCHE	2e COUCHE	3e COUCHE	4e COUCHE
76,75 $CaCO^3$	75,50 $CaCO^3$	76,75 $CaCO^3$	75,25 $CaCO^3$
77,00 »	75,25 »	77 50 »	75,25 »
76,25 »	76,00 »	78,00 »	74,75 »
76,50 »	76,75 »	78,00 »	75,00 »
76,75 »	76,75 »	77,50 »	75,50 »
76,50 »	76,50 »	77,25 »	76,00 »
77,25 »	77,25 »	76,75 »	76,25 »
77,50 »	77,50 »	76,50 »	76,50 »
78,00 »	77,25 »	76,50 »	76,50 »
77,75 »	76,00 »	76,25 »	76,75 »
76,50 »	76,50 »	76,75 »	77,25 »
76,00 »	76,75 »	76,00 »	77,25 »

Les échantillons de farine sont des échantillons instantanés, prélevés directement du séparateur ; ils accusent des écarts plus faibles que ceux fournis par le calcul. Par conséquent, le travail du séparateur, loin de faire perdre au mélange son homogénéité, a plutôt pour effet de le rendre plus intime, puisqu'en sortant du séparateur ce mélange ne présente sur la moyenne que des écarts de 1 % de $CaCO^3$, alors que le manque d'uniformité dans la composition de l'argile devrait donner lieu à des écarts de 1,75 % de $CaCO^3$.

Dans les mauvaises conditions où se trouve l'usine du Dr Bogdahn, il ne paraît guère possible d'obtenir des résultats aussi favorables avec n'importe quelle autre machine, à moins de re-

courir à des installations coûteuses et compliquées, tels que les silos pour l'emmagasinage des sablettes de calcaire et d'argile, des balances automatiques, etc. Mais, avec ces sortes d'installations compliquées on est très exposé à commettre des erreurs graves. Ainsi, par exemple, lorsque le contenu d'un silo cesse de s'écouler, ou qu'une des balances refuse de fonctionner, on peut n'avoir éventuellement dans le broyeur que de l'argile ou seulement du calcaire.

Il est clair, cependant, que le broyeur à boulets doit être alimenté régulièrement, ce qui est facile à obtenir par l'emploi des chargeurs automatiques et par la simplicité de l'installation, sinon il fournira un produit à teneur irrégulière en $CaCO^3$, qu'il soit combiné avec un séparateur à air ou avec un tube broyeur ; ce dernier, en outre, donnerait une poudre de finesse inégale.

Le Dr Bogdahn ajoute que l'emploi du broyeur-séparateur lui a donné les meilleurs résultats comme quantité et comme qualité dans le broyage des clinkers de four rotatif aussi bien que du charbon et des matières premières.

La poudre fine résultant des opérations que nous venons de décrire est généralement emmagasinée en quantités plus ou moins considérables avant d'être transformée en briques ou d'être envoyée dans le four rotatif. En agissant ainsi on poursuit un double but : d'abord créer une réserve qui permet d'assurer la marche ininterrompue des fours lorsque la préparation des matières vient à subir des arrêts; ensuite, se réserver la faculté d'apporter au dosage les rectifications reconnues nécessaires après coup.

Les poudres brutes sont conservées dans des réservoirs en bois, en fer ou en maçonnerie, divisés en compartiments pouvant contenir chacun la production d'environ une demi-journée. Si l'on dispose une série de six compartiments, on en remplit un et laisse deux autres vides, les trois autres étant supposés remplis et en train d'être vidés. La matière passe ensuite dans un mélangeur. Certains fabricants prétendent que l'hélice transporteuse installée devant les réservoirs mélange déjà suffisamment les poudres; c'est là une erreur qu'il convient de signaler, car le rôle de l'hélice consiste à transporter la matière, non à la mélanger. Pour obtenir un mélange parfait, il est indispensable de se servir d'un malaxeur.

Il n'est pas indifférent d'employer les appareils mélangeurs

quelconque. Un appareil de ce genre doit présenter un ensemble de qualités assurant à l'exploitation le maximum de garanties, tant au point de vue de l'homogénéité des mélanges réalisés qu'au point de vue de la marche économique du travail. En d'autres termes, le mélangeur idéal serait celui qui, dans le minimum de temps, avec le minimum de frais de marche et d'entretien, procurerait le plus grand rendement en produit rigoureusement homogène.

La machine représentée par la figure 41 sert à la fois à doser et à mélanger la matière. Elle se compose d'un certain nombre d'entonnoirs placés sur une même ligne; ceux-ci portent à leur partie

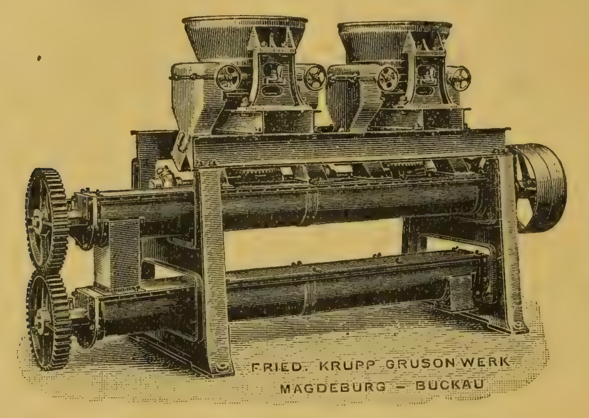


FIG. 41. — Doseur mélangeur à double vis transporteuse

inférieure deux ouvertures sous lesquelles est disposé un plateau mobile sur son axe et muni d'un système de couteaux d'arasement réglables à l'aide d'une vis et d'une roue à main : à chaque tour du plateau, ils séparent du tas formé sur le plateau une certaine quantité de poudre qui tombe dans des goulottes et de là dans l'auge de l'hélice placée en dessous.

Le rendement est d'environ 400 litres à l'heure pour un plateau de 400 mm., de 1.000 litres pour un plateau de 600 mm. et de 2.500 litres pour un plateau de 800 mm. La force motrice nécessaire est de 0,4—0,6—0,8 HP.

Les *silos* pour la conservation de la poudre brute sont construits presqu'exclusivement en béton armé; ils sont de forme carrée et mesurent 3 m. à 3 m. 50 de côté. Le nombre et la profondeur des compartiments varient suivant l'importance de la fabrication; ils

doivent pouvoir contenir la production de trois jurs, cependant leur contenance ne dépasse guère 12 m³. On place les compartiments sur deux rangs et l'on fait en sorte de faire circuler la matière soit par toutes les cellules, soit par la moitié seulement.

HYDRATATION DE LA POUDRE ET CONFECTION DES BRIQUES

Pour agglomérer la poudre et la transformer en briques, et même quand on emploie des fours rotatifs qui rendent cette transformation inutile, il est nécessaire de l'hydrater et de la malaxer pour bien répartir l'humidité dans toute la masse. A cet effet on la traite dans un malaxeur très simple qui se compose d'une auge en tôle dans laquelle tourne un arbre rectangulaire sur lequel sont montées des palettes et disposées en forme d'hélice, et du mécanisme de transmission de la force. La poudre brute est introduite à une extrémité, arrosée d'eau au moyen d'un tuyau muni de trous, saisie par les palettes de l'agitateur et amenée lentement vers l'extrémité opposée après avoir été malaxée très énergiquement dans tout son parcours.

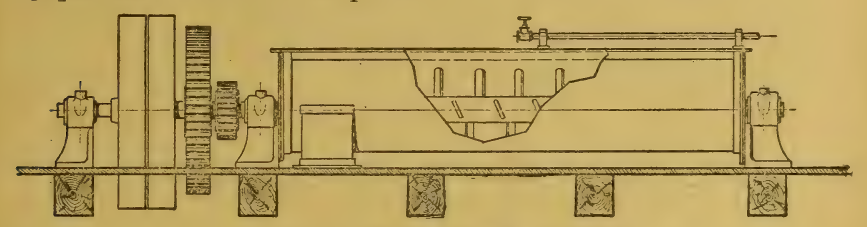


FIG. 49 *b*. — Malaxeur (Ateliers d'Arlod)

Un malaxeur de ce genre, dont les palettes ont un diamètre de 470 mm. et l'auge 2 m. 50 longueur, peut humecter à l'heure 5 m³ de poudre; un appareil dont les palettes ont un diamètre de 780 mm. et l'auge une longueur de 3 m. peut traiter 10 cm³ de poudre à l'heure. Force motrice 4 à 6 et 10 à 12 chevaux.

Lorsque la matière doit être pressée à l'état demi-humide, on y ajoute 8 à 10 % d'eau; lorsqu'elle doit être pressée à l'état humide, on en ajoute 18 à 23 %.

Dans le premier cas, il convient d'abandonner la matière à elle-même pendant 24 heures avant de la presser, afin de permettre à l'humidité de bien pénétrer dans toute la masse. La parfaite uniformité d'hydratation de la masse est une condition indispensable pour le briquetage de la matière. Dans le deuxième cas, il est

inutile de laisser reposer la matière; elle peut être dirigée directement du malaxeur dans la presse.

On distingue deux sortes de presses à briques. Lorsque la masse a été préparée par voie humide ou autrement et contient 10 à 23 % d'eau, la briqueteuse à filière est la seule qu'on puisse employer pour l'agglomérer; tandis que pour le traitement de la pâte sèche ne contenant que 7 à 10 % d'eau, ce qui est le cas de la poudre simplement humectée comme on l'a vu ci-dessus, il existe un grand nombre de machines très puissantes parmi lesquelles le fabricant peut faire son choix.

La presse à filière ne se distingue de la presse usitée dans les briqueteries par aucun organe essentiel. Elle se compose en principe d'un cylindre renfermant un malaxeur muni de palettes en forme d'hélice actionné par courroie et engrenages. La pâte, introduite dans le cylindre par une trémie dans laquelle tourne un régulateur cylindrique d'alimentation, est saisie par les palettes qui la malaxent et la chassent à travers la filière.

Devant celle-ci est placée une table sur laquelle se trouve un petit chariot recouvert d'une plaque qui, se trouvant au même niveau que la filière, reçoit le boudin de pâte : à l'aide de fils métalliques tendus sur un cadre, on découpe la pâte en briques de dimensions voulues. Pour faciliter le passage de la pâte par la filière, on humecte l'intérieur de celle-ci par un mince jet de vapeur ou d'eau.

Une briqueteuse de puissance moyenne peut produire par heure 600 à 2.000 briques avec une dépense de force motrice de 4 à 15 chevaux.

Presse à table tournante. — Cette presse se compose d'une carcasse de fondation, d'une table tournante à mouler les briques, de mécanismes de compression et de démoulage de la brique qui vient d'être moulée, de rotation périodique de la table combinée avec une cuve d'alimentation, et enfin du mécanisme de commande.

La table à mouler les briques porte 8 alvéoles à tampon de démoulage; elle se meut autour d'un axe vertical fixe. Les alvéoles sont remplies successivement de pâte contenue dans la cuve et viennent se placer sous le mécanisme de compression, qui agit sur la pâte et la transforme en brique. Celle-ci est soulevée de l'alvéole par un tampon et vient se placer sur la table, elle y reste

pendant que trois autres sont formées de même, de sorte qu'il y a toujours quatre briques achevées sur la table, d'où on les enlève pour les charger sur un wagonnet.

Si d'aventure une brique reste oubliée sur la table, elle en est balayée par une brosse qui passe en même temps sur les têtes des tampons de démoulage pour enlever les bavures qui peuvent y adhérer. Ce dispositif a pour but d'une part d'empêcher la brique de retomber dans l'alvéole dont le tampon serait alors actionné jusqu'à la limite de rupture, de l'autre de prévenir tout accident chez les ouvriers qui seraient tentés de toucher aux alvéoles pendant le fonctionnement. Les accidents de ce genre sont fréquents avec les presses à alvéoles ouvertes.

Tous les organes de la presse sont actionnés sur un seul point, de sorte qu'elle fonctionne d'une manière automatique. En dehors de la poulie de commande, elle ne comporte que deux jeux d'engrenages pour la transmission de l'énergie.

La compression de la pâte s'effectue à l'aide d'un système de levier différentiel dont la pression est facilement surmontée par la force de traction de la courroie sans le secours d'un volant.

Cette presse fonctionne d'une manière continue. Sa production est d'environ 1.200 briques de dimensions normales, avec une dépense de force motrice d'environ 6 chevaux.

Il arrive souvent qu'on soit obligé de mettre en œuvre la pâte obtenue par délayage avant qu'elle ne soit suffisamment concentrée et épaissie; mais, en cet état elle ne peut être agglomérée par la presse. Il est alors nécessaire de l'épaissir par l'addition de la quantité nécessaire de matière séchée artificiellement (dans bien des cas il suffit d'y ajouter les résidus des séchoirs à galerie) et broyée sommairement à l'aide du broyeur cylindrique, du broyeur Carr ou d'une machine analogue. Mais, on se gardera de rendre la pâte trop épaisse par l'addition d'une quantité exagérée de matière sèche, car on s'exposerait à briser certains organes de la presse.

Plus la pâte contient d'eau, plus il faudra dépenser de combustible pour sécher les briques. A ce point de vue, les presses pour pâte sèche travaillent plus économiquement que les presses pour pâtes tendres, elles exigent aussi beaucoup moins de force motrice. Par contre, les briques faites de pâte très humide et bien séchées sont beaucoup plus solides que celles faites de pâte sèche, et il convient de tenir compte de ce fait dans le choix du système de four à employer.

En dehors des machines que nous venons de décrire, on emploie également des presses hydrauliques ou des presses mues par transmission. Leur construction diffère beaucoup de celle des presses à chocs et leur rendement est très faible ; mais elles présentent l'avantage de pouvoir agglomérer des matières très friables à faible teneur en eau (4 à 5 %). Les briques ainsi obtenues peuvent, dans certains cas, être dirigées directement sur le four sans dessiccation préalable.

Presses « Buhler » pour le briquetage à sec de la poudre crue

La maison Buhler Frères à Uzwil (Suisse) construit un modèle de presse qui a donné des résultats particulièrement satisfaisants pour le briquetage à sec de la poudre crue de ciment. Les figures 50 et 51 représentent cette presse vue de face et vue par l'arrière. C'est une presse à genouillère ; elle est caractérisée par le fait que la pression s'exerce simultanément sur les deux faces de la brique avec une valeur égale, de sorte que les briques sont beaucoup plus compactes que les briques obtenues avec une presse ne pressant que sur une des faces de la brique.

La genouillère est actionnée au moyen d'un arbre manivelle puissant et d'une bielle. L'arbre de manivelle est lui-même mû par l'intermédiaire d'un double train d'engrenages. Les surfaces frottantes des organes de la genouillère ont été étudiées très spécialement et dimensionnées très largement. Elles sont graissées automatiquement par bain d'huile et la genouillère est protégée contre les poussières par une enveloppe hermétiquement close, fixée d'une part au sommier supérieur et d'autre part au réservoir à l'huile de l'articulation inférieure de la genouillère. Cette protection a été enlevée sur les deux clichés ci-contre pour la compréhension du mécanisme.

L'articulation supérieure de la genouillère est fixée à un piston hydraulique de sûreté qui, grâce à des soupapes de construction spéciale, limite à un maximum déterminé la pression exercée par la presse. Ce dispositif évite complètement les accidents qui se produisent souvent dans des presses de construction semblable par suite de remplissage exagéré du moule ou de l'introduction de corps étrangers dans ce dernier. Les pistons de compression peuvent être chauffés à la vapeur pour éviter l'adhérence à leur face de la matière à briqueter.

La pression exercée par la presse est contrôlable à chaque pressée et elle peut être réglée sans qu'il soit besoin d'arrêter la presse grâce à un mécanisme spécial breveté de réglage du remplissage.

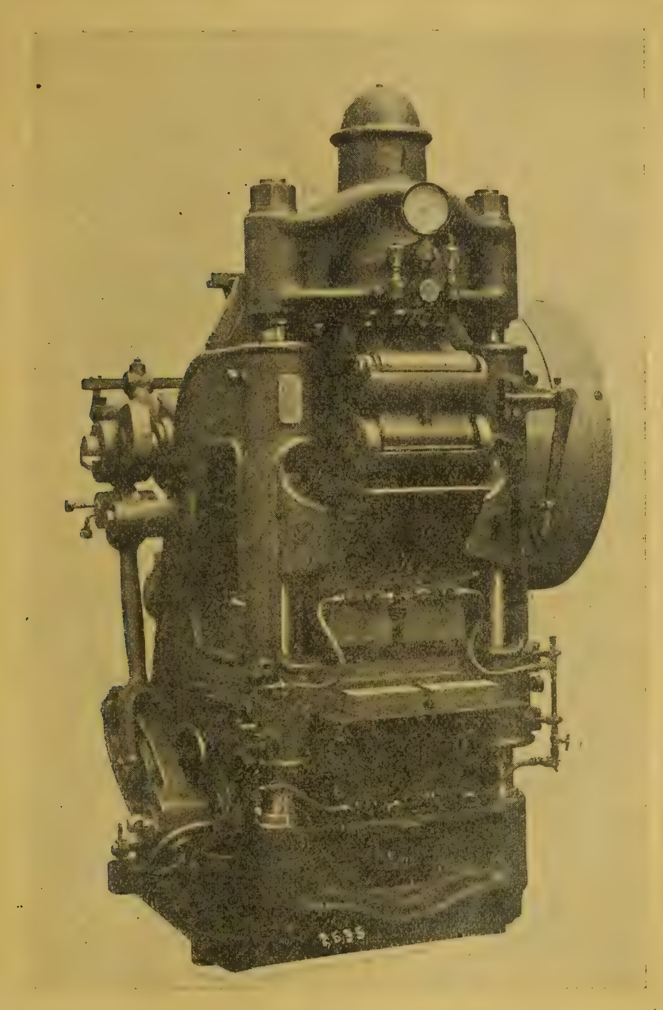


FIG. 50. — Presse à genouillères, système Bühler, pour briquetage à sec de la poudre. Vue de face

Il convient de faire remarquer tout spécialement que, contrairement à ce qui a lieu dans certaines machines de même genre, les bâtis dans les presses Buhler ne supportent aucune pression ; toute la pression exercée par la presse est transmise aux deux

sommiers (supérieur et inférieur), qui sont construits en acier coulé, et aux colonnes reliant les sommiers. La plupart des organes de la presse sont construits en acier coulé.

La maison Buhler construit ses presses modèle T A en deux grandeurs, la presse TA I qui correspond à la production d'un four de 30 à 35 tonnes et la presse TA II qui correspond à la production d'un four de 50 tonnes.

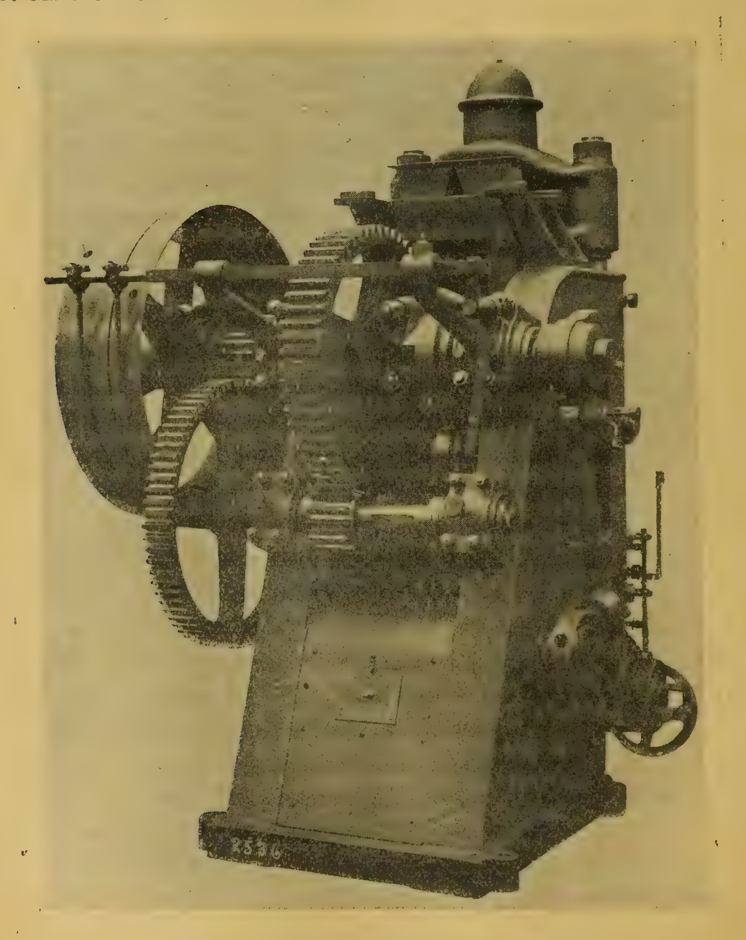


Fig. 51. — Presse Bühler. Vue arrière

Les briques sont éjectées automatiquement et, quand il s'agit d'installations à enfournement automatique, il suffit de relier la table de la presse à la goulotte d'entrée du distributeur automatique pour que l'alimentation ait lieu sans nécessiter aucune main-d'œuvre.

Nous venons de voir que les briques obtenues par briquetage à sec avec la presse Bühler peuvent être enfournées directement. Mais il n'en est plus de même pour les briques à 18-22 % d'eau. Avant d'être soumises à la cuisson, elles doivent être de nouveau débarrassées de l'eau qu'on y a ajoutée en vue de leur agglomération. Plus cette dessiccation sera parfaite, mieux s'effectuera la cuisson non seulement dans le four continu à cuve, mais encore dans le four circulaire.

Le séchage des briques peut s'effectuer par leur exposition soit à l'air et au soleil sous un hangar, soit à la chaleur produite artificiellement; les conditions locales guideront le fabricant dans le choix de la méthode à adopter. Lorsque les salaires sont peu élevés et qu'on dispose d'espaces suffisamment étendus, on a tout intérêt à adopter la première méthode qui, au point de vue économique, présente des avantages réels. Ces conditions cependant ne se rencontrent que rarement, si ce n'est dans les pays chauds.

En règle générale donc, on aura recours au séchage par la chaleur artificielle, en chauffant le séchoir par un foyer spécial, par l'air chaud du four à ciment, ou enfin par les vapeurs de retour de la machine. Le séchage artificiel est beaucoup plus sûr et plus régulier que le séchage à l'air; il n'est influencé ni par le vent ni par la pluie. Il n'en constitue pas moins une opération coûteuse, compliquée, ennuyeuse; toute autre sera la situation du fabricant qui disposera d'un système de cuisson qui lui permettra de se dispenser non seulement du séchage des briques, mais encore de la confection des briques elles-mêmes, ainsi que nous le verrons plus loin.

Un des systèmes de séchoir les plus répandus est celui de Moeller et Pfeiffer. Ce système, installé pour la première fois en 1895, n'a pas reçu moins de 90 applications en trois ans (tuileries, briqueteries, pierres artificielles, fabriques de ciment). Il est construit en deux modèles différents comportant l'un le chauffage indirect, l'autre le chauffage direct; le séchage s'opère avec une égale régularité dans l'un et l'autre, et la seule différence est que le premier coûte plus cher d'installation, mais est d'un entretien moins coûteux, tandis que pour le second c'est l'inverse.

Les séchoirs à canaux de Moeller et Pfeiffer à chauffage indirect sont représentés par les figures 52, 53 et 54.

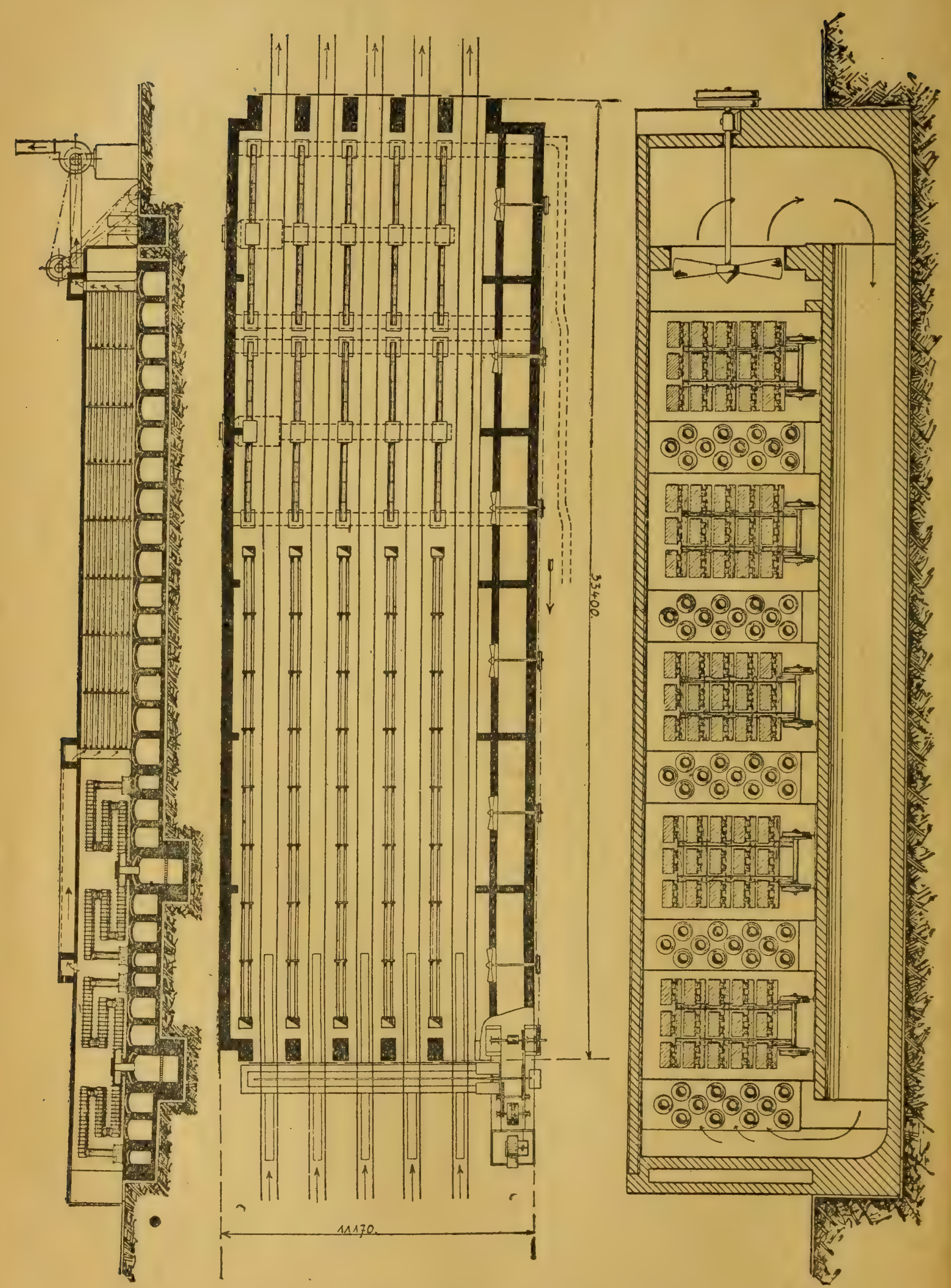


Fig. 52, 53 et 54. — Séchoir Moeller et Pfeiffer. — (Fig. 52, coupe longitudinale ; fig. 53, plan ; fig. 54, coupe transversale)

Les canaux sont en maçonnerie et ont environ 35 m. de long; les briques y sont séchées sur des wagonnets circulant sur des voies ferrées dont le nombre varie de deux à neuf, suivant l'importance de l'installation. Entre chaque voie se trouvent des systèmes de chauffage qui sont espacés sur toute la longueur du canal. En outre, des ventilateurs installés sur un des côtés du canal y envoient un fort courant d'air chaud qui circule autour du système de chauffage, se refroidit au contact des briques, puis se réchauffe de nouveau en passant sur le système de chauffage situé plus loin (voir la coupe représentée par la figure 54). Grâce à cette disposition, la chaleur est bien utilisée, sa transmission aux matières à sécher et le rendement du séchoir sont considérables. Les matières s'échauffent graduellement ; à partir de la température extérieure, elles arrivent dans des zones de plus en plus chaudes jusqu'à la sortie du canal ; par suite, elles se déshydratent uniformément, tandis que l'air sec du canal se sature d'humidité.

Pour utiliser le calorique dans la mesure du possible, on fait passer l air chaud saturé d'humidité dans un système de chauffage par condensation installé à l'extrémité du canal (visible sur la fig. 52). L'air saturé passe dans les tuyaux fortement refroidis à l'extérieur, ce qui permet de récupérer la chaleur combinée à la vapeur d'eau dont il est chargé. L'eau de condensation s'écoule dans le réservoir placé dans la salle des chaudières. L'air sec refroidi et déshydraté dans les tuyaux est évacué au dehors à l'aide d'un petit ventilateur; il est alors à une température supérieure de quelques degrés seulement à celle de l'air extérieur.

La partie antérieure du canal est chauffée par un calorifère. Le chauffage est donc direct ; les gaz de la combustion ne pénètrent pas dans l'intérieur du canal, et par conséquent l'outillage qu'il renferme est à l'abri de toute détérioration, ce qui lui assure une durée indéfinie. Suivant ses dimensions, ce séchoir peut sécher 10.000 à 50.000 briques de ciment brut par jour.

Canaux système Moeller et Pfeiffer à chauffage direct et central. — Les séchoirs à chauffage direct peuvent être installés partout où l'on a du combustible exempt de soufre et où l'on tient à économiser sur les frais d'installation. Ils utilisent très bien la chaleur du combustible; mais, d'un autre côté, le contact incessant des gaz de la combustion avec l'outillage a pour effet de le détériorer au bout d'un certain temps. La disposition des canaux

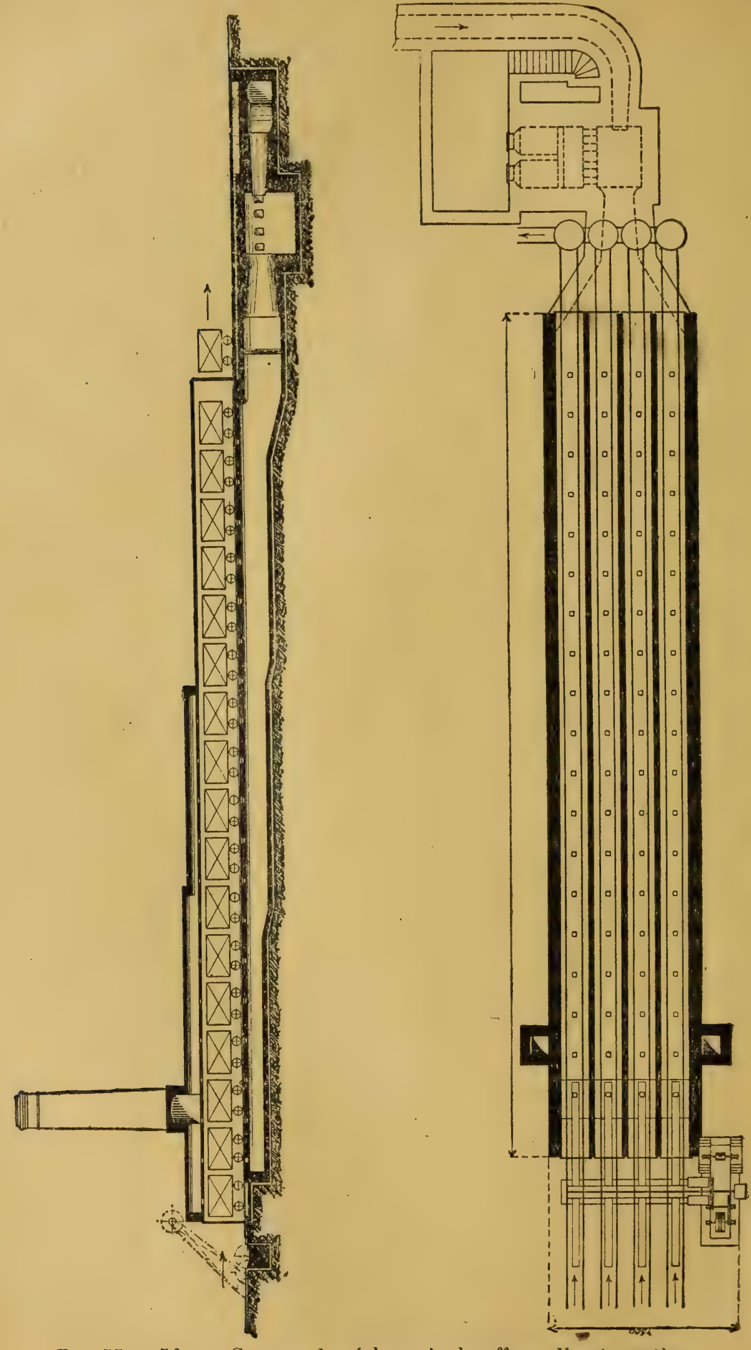


Fig. 55 et 56. — Canaux de séchage à chauffage direct, système Moeller et Pfeiffer

est représentée par les figures 55 et 56 ; ils ont une longueur de 35 m. et on y installe deux à huit voies parallèles sous lesquelles passent les caniveaux destinés à amener les gaz de la combustion. Les wagonnets sont actionnés, comme dans les canaux à chauffage indirect, à l'aide d'un treuil automatique. Ces canaux sont peu coûteux et fonctionnent bien, on peut y faire sécher 8.000 à 10.000 briques à pâte molle.

Un autre séchoir à canaux de construction très simple est le séchoir à tunnel de Cummer. Il se compose d'un ou de plusieurs canaux en maçonnerie d'environ 35 m. de long, 2 m. de large et de haut. Dans chaque tunnel sont installées deux voies ferrées pouvant contenir 40 wagonnets à étages chargés d'environ 10.000 briques normales. Au point de sortie du canal sont installés le four avec grille à étages et un ou deux ventilateurs. Entre le four et le tunnel est située la chambre de mélange dans laquelle les gaz de la combustion sont ramenés à une température d'environ 300° par leur mélange avec l'air froid aspiré du dehors, et de laquelle ils sont conduits dans les canaux séchoirs à l'aide de ventilateurs. Un système de registres et de clapets permet de régler à volonté la température de l'air chaud à son entrée dans chaque canal. Cette température est d'environ 135-180°, tandis qu'elle ne dépasse pas 30° dans les cheminées de dégagement.

Pour régler le tirage de ces dernières et soustraire leur fonctionnement aux influences du vent, on y a placé en dernier lieu des exhausteurs. Par ce moyen on est arrivé à diminuer la durée du séchage et à augmenter le rendement de l'installation. Une autre modification consiste dans la diminution du diamètre des canaux; de cette manière l'air sec ne peut plus se diriger vers la sortie par le chemin le plus court, mais il est forcé de transmettre presque intégralement son calorique à la matière soumise à la dessiccation. Enfin, la température de l'air peut être réglée de telle sorte qu'elle soit partout uniforme en pénétrant dans les canaux.

Lorsque le travail est soigné, les séchoirs à tunnel donnent d'excellents résultats. En y brûlant de la houille de bonne qualité, on obtient et dépasse même un coefficient de vaporisation de 1 : 10 à 1 : 12, ainsi que le prouvent des expériences qui ont été faites à ce sujet.

Le séchoir Cohrs utilise la chaleur perdue du four circulaire; il

est emprunté à la poterie, pour laquelle il avait d'abord été construit. Il est installé dans plusieurs fabriques de ciment et donne de bons résultats.

Il est représenté par la figure 57. Sa construction s'écarte sensiblement de celle des séchoirs décrits plus haut. Dans le bâtiment du four sont installées des chambres fermées à la partie supérieure par un toit hermétiquement clos, et à la partie inférieure par deux planchers dont l'inférieur, supporté par des colonnes et des canaux voûtés, est également étanche. Le plancher supérieur est fait de planches placées à une certaine distance les unes des

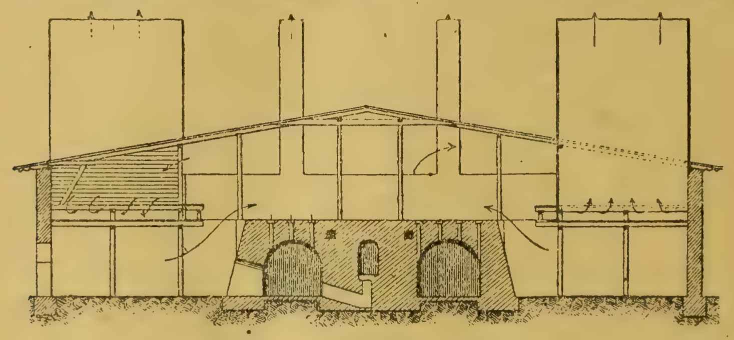


Fig. 57. — Séchoir Cohrs

autres; les intervalles communiquent avec l'air extérieur par des tirages. La galerie installée au niveau de ce second plancher sert à amener les briques humides dans les chambres et à évacuer les briques sèches. A la hauteur des chambres les murs sont massifs; au-dessous, ils sont munis de portes et de volets mobiles qui permettent de régler l'entrée de l'air.

L'air entrant par ces ouvertures s'échauffe en passant sur les parois du four, passe dans l'étage supérieur et, comme il ne peut s'échapper par le toit qui est hermétiquement clos, il est obligé de pénétrer dans les chambres de séchage, de chauffer et sécher les briques fraîches qu'on y a placées; finalement, saturé d'humidité, il passe par les interstices du plancher et se dégage dans les cheminées. Celles-ci sont assez élevées et disposées de manière à faire un puissant appel d'air dans l'intérieur du bâtiment.

L'expérience montre que les chambres du séchoir Cohrs sont plus que suffisantes pour sécher la quantité de briques nécessaires à l'alimentation du four circulaire, et qu'elles produisent jusqu'à 1 fois $\frac{1}{2}$ cette quantité.

Nous verrons plus loin, en décrivant les fours à ciment, que le four circulaire moderne, combiné avec une installation de presses pour pâte sèche, permet de faire l'économie d'une installation spéciale de séchage, de sorte que le séchoir Cohrs lui-même n'est indiqué que dans les cas où l'on est obligé de préparer des briques à pâte molle (à 18-22 % d'eau). Dans ces conditions, ce séchoir peut être installé économiquement, vu qu'il n'exige pas de grands frais d'entretien.

Séchoir Melhuba. — L'introduction du four rotatif a amené dans l'industrie du ciment une véritable révolution. Mais, parmi les anciennes usines il y en a beaucoup qui, pour des raisons faciles à comprendre, n'ont pu suivre le mouvement. Tout en conservant l'ancien four, elles ont cherché à y apporter des modifications ayant pour but de diminuer soit la consommation de charbon, soit la main-d'œuvre.

Une machine construite dans ce but est le séchoir rotatif breveté Melhuba, représenté par les figures 58 et 59. Cet appareil est

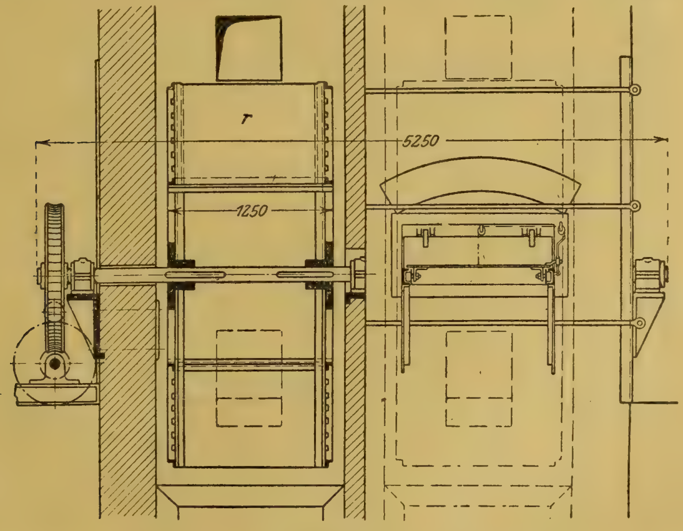


Fig. 58. — Séchoir Melhuba. Vue en Coupe

destiné à remplacer les anciens séchoirs dont l'installation et le fonctionnement sont très coûteux, et dans lesquels les briquettes préparées avec les matières additionnées des 12 à 20 % d'eau sont séchées au point voulu pour pouvoir être placées dans le four à cuve en vue de la cuisson. Le nouveau procédé consiste à faire

sécher la matière réduite en briquettes, non dans des séchoirs spéciaux à galerie, mais dans le réchauffeur du four lui-même. A cet effet, on installe dans le four *d* une roue à compartiments ou cellules *r*, mue à l'aide d'une roue dentée et d'une manivelle, et enfermée de toutes parts, accessible seulement par une ouverture de chargement *a* munie d'un clapet *s*. Après avoir rempli de briques une rangée de cellules, on ouvre le clapet *s*, on remplit la

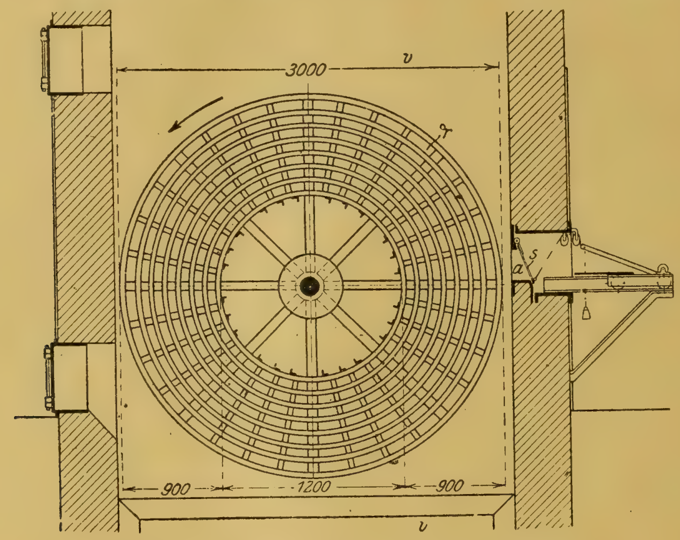


Fig. 59. — Séchoir Melhuba. Vue en élévation

rangée de cellules qui se trouve alors au niveau de l'ouverture *a*, on referme le clapet, on fait tourner la roue d'une rangée, et ainsi de suite. Les briques, séchées par les chaleurs perdues du four, se déchargent automatiquement dans le réchauffeur sur le côté opposé au chargement, et de là elles se rendent dans le creuset du four. Comme on le voit, le service de cette machine est d'une extrême simplicité.

La roue à cellules est surtout avantageuse dans les usines où la matière brute est transformée en briquettes à l'aide de la presse à filière et additionnée d'environ 20 % d'eau, dans les cas par conséquent où le système du four (tel que le four à étages de Dietzsch) exige que la matière soit sous forme de briques solides. Lorsque la nature des matières premières et le système de four, comme par exemple le four Buhler, permettent de faire les

briquettes avec la matière presque sèche (avec addition de 8-10 % d'eau), on pourra se passer du séchage artificiel quel qu'il soit, ce qui permet de simplifier considérablement l'installation. Si, en outre, on ajoute le combustible (coke réduit en sablettes) directement à la matière avant de la réduire en briquettes, comme cela se fait maintenant dans les nouvelles installations (voir plus loin), on réalise un autre avantage considérable.

LE PROCÉDÉ DEMI-HUMIDE

Dans le procédé demi-humide l'argile, qui est généralement l'élément le plus chargé de sable des deux, est seule délayée, et la pierre calcaire est ensuite ajoutée sous forme de poudre fine, sèche, à la boue argileuse. Dans certains cas, lorsque l'argile est exempte de sable et naturellement très humide, une simple addition d'eau et de poudre de chaux sèche suffit pour la transformer en une masse plastique pouvant être transformée en briques assez solides à l'aide de la presse. Dans ces sortes de cas, le délayage n'existe donc pas au sens propre du mot.

Une importance toute spéciale s'attache au travail de malaxage dans le procédé demi-humide.

A cet effet, la poudre de pierre à chaux et la boue d'argile sont pesées dans des balances automatiques et amenées ensuite dans des malaxeurs d'où ils sortent, après un malaxage soigné, sous forme d'une pâte ayant la composition voulue.

La parfaite régularité des opérations est subordonnée à deux conditions essentielles. La première est que la balance automatique soit d'un fonctionnement sûr; la seconde, non moins importante, est que les deux matières, par conséquent la poudre calcaire et la boue d'argile, soient mélangées intimement dans l'espace de temps le plus court, par un malaxage énergique, et réduites en une pâte homogène dont toutes les parties aient la composition voulue. Le malaxeur à contre-courant réalise bien ces desiderata. Il se compose en principe de deux arbres placés parallèlement dans une auge, munis de palettes inclinées dans le même sens et tournant en sens opposé et à une vitesse différente. L'un des agitateurs chasse la matière avec une certaine vitesse dans une direction, tandis que l'autre la chasse avec une vitesse plus grande dans la direction opposée. Ce contre-courant force la matière à traverser l'auge dans toute sa longueur, effectue le mélange in-

time des deux éléments dont elle se compose et l'expulse finalement à l'état d'une masse homogène.

LE PROCÉDÉ BERGGREEN

Il nous reste à dire un mot du procédé Berggreen. Plus d'un fabricant, ayant à sa disposition de la chaux pure, tendre, et de l'argile de même qualité, a dû se dire en lui-même qu'il devait être possible de s'affranchir du procédé humide ou demi-humide, et de transformer ces matières, à l'aide de machines appropriées, en une pâte ayant la composition voulue et l'humidité nécessaire pour être transformée en briques dans la presse à filière. V. Berggreen fut le premier qui réalisa pratiquement cette idée. Son procédé consiste à peser et mélanger en proportions convenables la chaux et l'argile telles qu'elles sortent de la carrière, à les broyer à l'aide d'un broyeur à cylindres, à bien les mélanger, les humecter et les transformer en briques.

Il est clair sans plus que ce procédé n'est applicable que si l'on dispose de matières tendres très pures; c'est pour avoir perdu de vue ces conditions essentielles qu'on a fait fausse route dans certains cas. Mais l'expérience montre que lorsque les matières premières réunissent ces conditions, le ciment obtenu supporte très bien la comparaison avec les produits fournis par les autres procédés.

MARCHE DU TRAVAIL DANS LE PROCÉDÉ SEC

Les développements que nous avons donnés plus haut sur le mode d'application du procédé sec nous ont montré les nombreuses variantes dont il est susceptible. Pour mieux les mettre en évidence, nous allons exposer sommairement, en partie d'après Naske (1), la marche des opérations telles qu'elles se suivent dans certaines grandes fabriques de ciment. Dans la première de ces fabriques on effectue le broyage des matières en partie séparément, en partie ensemble; on les fait sécher et moudre ensuite à l'état de mélange; dans la deuxième, la chaux et l'argile sont broyées, séchées séparément et moulues finement ensemble, tandis que dans la troisième on traite les matières séparément jusqu'à la mouture fine inclusivement. Vu la grande uniformité de composition des

(1) Cf. *Rev. des Matér. de construction*, 1908.

matières premières, la fabrique citée en troisième lieu a pu se dispenser des silos de poudre brute, dont l'installation est toujours recommandable. Enfin dans les quatrième et cinquième fabriques, les matières sont broyées et séchées séparément comme dans la deuxième, et moulues finement ensemble; l'installation du four rotatif dans ces deux fabriques simplifie considérablement l'ensemble des opérations, puisqu'elle permet de supprimer la confection et le séchage des briques.

Fabrique I. — Production : 10.000 kg de farine brute à l'heure.
Argile plastique, jusqu'à 25 p. 100 d'eau.
Pierre à chaux (marne) : dureté moyenne, 7 à 9 p. 100 d'eau.

Argile :	Pierre à chaux :
Laminoir 550 × 400	2 concasseurs 500 × 320
Transporteur	Transporteur.
Séchoir.	2 laminoirs 750 × 450.
Transporteur.	?
Cylindre	Séchoir
Fin (Gros)	Transporteur.
Silo I.	Silo II.
Hélice.	Hélice.
Balances automatiques nº 1	Balances automatiques nº 3.

Tambour transporteur et mélangeur.
Transporteur. Hélice distributrice
8 meules courantes 1 500
Hélice transporteuse. Hélice.
8 homogénéiseurs cylindriques 1 000 × 4.000
Hélice. Hélice pour fine mouture.
Hélice distributrice.
8 magasins (silos).
Hélice collectrice. Elévateurs à godets.
Appareil mélangeur et hélice.
2 hélices humecteuses 500 × 2·500.
6 canaux sécheurs.
Four droit.

Fabrique II. — Production : 7.500 kg à l'heure.
Argile : modérément plastique, à 18 p. 100 d'eau.
Pierre à chaux : dureté moyenne, 3 à 6 p. 100 d'eau.

Laminoir 550 × 400 — Transporteur funiculaire.
Monte-charge.
Bascules.
Concasseurs 500 × 320.
Machines à sécher (Fellner et Ziegler).
Broyeur à meules 1 800 × 450 avec plateaux circulaires.
Elévateur.
2 moulins à cylindres 400 × 1.000
2 moulins à tubes n° 12
Elévateur à godets et à hélices.
Hélice distributrice au-dessus des silos.
Hélice collectrice — Elévateur à godets.
Hélice humecteuse.
Presse sèche
Four annulaire (Hoffman).

Fabrique III. — Fabrication : 12.000 kg farine brute à l'heure.
Argile : pierreuse, schisteuse, 5 à 8 p. 100 d'eau
Pierre à chaux : extrêmement dure, 1 1/2 p. 100 d'eau.
Peut être mise en œuvre après séchage à l'air.

Argile :
2 hélices broyeuses 210 × 500.
Transporteur.
Séchoir
Transporteur. Hélice.
3 meules 1.500
Hélice. Transporteur. Hélice.
2 homogénéiseurs hexagonaux 1.000 × 4.000
Gros

Pierre à chaux :
2 concasseurs 550 × 320.
2 transporteurs.
2 laminoirs 750 × 450.
2 transporteurs.
4 moulins à pendule.
Hélice. Transporteur. Hélice.
Bascule automatique 3.

Hélice à fine mouture.
Balance automatique I.

Tambour extracteur et mélangeur
2 mélangeurs à contre-courants 300 millimètres
2 presses à hélice
8 canaux de séchage
Four droit

Fabrique IV. — Production : 10.000 kg de farine brute à l'heure

Argile : draguée, 22 p. 100 d'eau, tombe souvent en poudre au séchage.

Pierre à chaux très dure, peu humide

Argile : Laminoir 550 × 400 | Tambour sécheur | Silo | Doseur automatique

Pierre à chaux : Concasseur à cône 600 × 450. | Tambour sécheur | silo | Doseur automatique

Transporteur à godets | Réservoir | Broyeur-Sélecteur Pfeiffer frères n° H 18 | Transporteur. Hélice distributrice | Silos à farine brute | Hélice humecteuse | 1 four rotatif.

Fabrique V. — Production : 15.000 kg de farine brute à l'heure.

Marne calcaire, Marne argileuse } Pierreuse, dureté moyenne. Peu humide.

Marne argileuse : | Câble ? | Hangar | Chemin de fer électrique suspendu | ? | Transporteur | Tambour sécheur 1,8-20 mètres de long ; chauffé avec les gaz d'échappement du four rotatif. | Transporteur | Silo

Marne calcaire : | Câble | Hangar | Chemin de fer électrique suspendu | ? | 2 Transporteurs | 2 tambours sécheurs comme ci dessus | 2 Transporteurs | Silo

Bascules | Transporteur | Tambour extracteur et mélangeur | Réservoir | 2 Cémentors (Polysius) | 2 moulins à tube (Polysius) | Transporteur et hélice | Silos mélangeur et d'approvisionnement | 3 hélices humectueuses | 3 fours rotatifs à zone de cuisson élargie.

CHAPITRE VI

LA CUISSON DU CIMENT

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

La cuisson du mélange brut de chaux et d'argile est sans conteste l'opération la plus importante de la fabrication du ciment; de sa bonne exécution dépendent à la fois la qualité du produit et le bénéfice de l'exploitation. Par suite, le choix du système de four doit être fait avec un soin judicieux dans toute installation nouvelle, car toute erreur commise à ce point de vue entraîne les suites les plus graves et peut même compromettre la viabilité de l'entreprise.

Pour obtenir une cuisson régulière, il est nécessaire de remplir trois conditions fondamentales. La première est de veiller à ce que la matière brute ait bien la composition requise, à laquelle la science chimique a assigné des limites qu'il ne faut transgresser ni par défaut ni par excès. C'est en se tenant dans ces limites qu'on cherchera à établir la proportion respective des deux composants qui donnera les meilleurs résultats compatibles avec la composition des matières. Il est établi que les masses riches en calcaire donnent les ciments les plus solides, mais qu'elles exigent en même temps une plus grande quantité de combustible et exposent au danger d'expansion. Les masses riches en argile sont plus faciles à cuire et les clinkers qui en résultent sont faciles à broyer ; elles excluent généralement le danger d'expansion ; mais le ciment est moins solide, la masse est exposée à s'effriter pendant la cuisson, et à devenir alors gênante pour la combustion dans le four ordinaire à cuisson intermittente.

La deuxième condition requise pour la bonne marche de la cuisson est que les matières soient finement moulues et bien mélangées. Le degré de finesse qu'il convient de donner à la

mouture ne peut être fixé exactement une fois pour toutes, pas plus qu'on ne peut imposer une composition chimique invariable pour les matières brutes, car ici encore la nature spéciale des matières dont on dispose joue un rôle qu'il faut déterminer spécialement dans chaque exploitation. D'une manière générale cependant, on peut affirmer que plus le broyage est fin, mieux cela vaut. Il faut apporter un soin tout particulier à remplir cette condition dans la mise en œuvre de pierre à chaux dure, à teneur élevée, ou encore lorsque l'argile contient du gros sable difficile à transformer en silicates par la cuisson. La marne calcaire dont la teneur en $CaCO^3$ se rapproche de celle du mélange brut n'a pas besoin d'être broyée aussi finement. On se basera donc dans chaque cas particulier sur la composition chimique et la nature physique des matières pour fixer le degré de finesse à lui donner, tout en se rappelant cependant que le broyage fin coûte de l'argent et qu'il a des limites. Le mélange intime des deux composants ne présente pas une moindre importance, ainsi que nous avons eu l'occasion de le faire remarquer dans un chapitre précédent.

Un troisième facteur qui doit influer sur le choix du four, est la nature des briques après le séchage. Si elles sont friables et donnent beaucoup de poussière, on adoptera un système de four dont le fonctionnement sera le moins gêné par ces propriétés. En outre, on devra mouler la pâte à l'état humide au moyen de la presse à filière à moins qu'on emploie le four rotatif. Lorsque la matière, moulée à l'état de pâte sèche ou demi-humide, fournit des briques solides, résistant à toutes les manipulations, on a une latitude beaucoup plus grande dans le choix du four. Mais, pour être fixé sur ce point comme d'ailleurs sur la plupart des autres, le moyen le plus simple à employer est de faire des essais préalables ; ceux-ci absorbent du temps et exigent de la patience, mais ils sont indispensables.

En ce qui concerne la conduite du four, il y aurait beaucoup à dire ; mais les connaissances qu'elle exige ne peuvent être acquises que par la pratique, à laquelle aucun enseignement ne peut suppléer. Quel que soit le système de four qu'on emploie, on s'imposera comme règle fondamentale de faire cuire le ciment dans le minimum de temps possible et de refroidir les clinkers rapidement. De la bonne marche du four dépend le succès de la fabrication.

Les fours actuellement employés peuvent se diviser en trois groupes savoir :

a) Les fours à cuve.

b) Les fours circulaires.

c) Les fours rotatifs.

Nous allons décrire les principaux représentants de chaque groupe.

FOURS A CUVE

La cuisson du ciment se fait à peu près exclusivement en fours à travail continu ; les fours à marche intermittente, dans lesquels le combustible et la matière à cuire sont disposés par couches alternatives, consomment beaucoup de combustible et absorbent une main-d'œuvre coûteuse. C'est donc uniquemnt à titre de document que nous donnerons la description d'un four ordinaire à marche intermittente dont dérivent d'ailleurs tous les fours à travail continu (à l'exception du four circulaire emprunté aux tuileries, et du four rotatif).

Le four ordinaire se compose d'une cuve revêtue de briques réfractaires, munie d'ouvertures latérales et d'une grille plane amovible. La masse brute pour ciment, qu'elle soit sous forme de roches irrégulières ou moulée en briques, y est disposée en couches alternant avec le combustible, qui est généralement du coke, par des portes latérales disposées à différentes hauteurs. Une porte ménagée au-dessus de la grille permet de placer sur celle-ci des fagots pour l'allumage ; lorsque le feu s'est communiqué au combustible proprement dit, on ferme hermétiquement cette ouverture . On ferme et lute de même les portes de chargement consolidées extérieurement par des portes en fer. L'air nécessaire entre par la grille, et la combustion se continue alors sans l'intervention du chauffeur ; elle suit une marche plus ou moins régulière suivant le degré de siccité de la matière, le soin apporté au chargement et parfois de circonstances qu'il est impossible de prévoir. Il arrive souvent que la combustion s'arrête ou se ralentit au point qu'il devient impossible de faire cuire le ciment ; on est alors obligé de vider le four et de le charger à nouveau. Lorsque la marche de la combustion n'est pas réglée par des circonstances fortuites, elle dépend à la fois de la proportion du

combustible et de la disposition plus ou moins réussie de la matière soumise à la cuisson.

La température de cuisson est le rouge blanc; elle est plus élevée pour la pierre calcaire pure que pour la chaux tendre et friable ; elle présente d'ailleurs des limites pas trop étroites. Au rouge sombre la chaux exerce déjà sur l'argile une action très énergique ; au rouge vif, maintenu pendant une heure, la silice de l'argile se dissout : la masse présente alors une couleur gris-jaunâtre clair, s'échauffe fortement dans l'eau, ne se durcit que très peu et s'effrite à l'air. Au rouge blanc, la masse devient grise avec reflet verdâtre ; à une température plus élevée, elle prend une couleur gris-bleu, acquiert une densité de plus en plus grande, devient basaltique et se vitrifie. Dans la première phase le ciment forme une poudre claire, jaune brun, légère au toucher ; dans la seconde phase il se trouve à son état normal et forme une poudre grise avec nuance verdâtre, dure au toucher ; dans la troisième phase il est gris-bleu, et dans la dernière il donne une poudre gris sale excessivement dure au toucher.

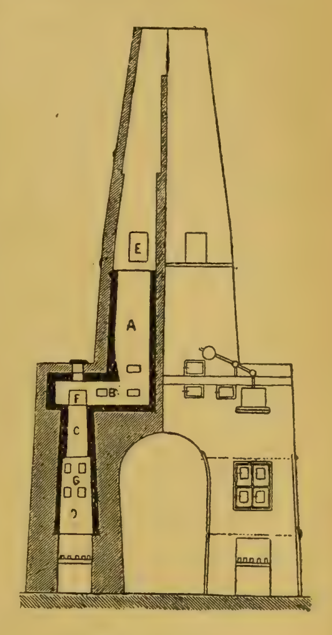


Fig. 60. — Four ordinaire

Lorsque la cuisson est achevée, on retire les barreaux de la grille, la masse cuite tombe alors dans le cendrier d'où on la retire; on la trie ensuite, puis on la transporte au point voulu pour la suite du travail.

Les fours intermittents ont généralement 2-3 m. de diamètre, 15 m. de hauteur totale dont 6 à 8 m. sont afférents au creuset.

Les fours intermittents présentent de graves inconvénients : la masse pâteuse se colle souvent aux briques de la chemise et met dans l'impossibilité de travailler à marche continue; la main-d'œuvre est considérable; après chaque opération on est obligé de laisser refroidir le four avant d'en commencer une autre; enfin la majeure partie des gaz de la combustion se dégage en pure perte et entraîne une forte dépense de combustible (environ 30 à

35 % de coke du poids des clinkers). Tous ces inconvénients ont amené les ingénieurs à construire des fours à marche continue dont le plus typique est le four à étages de Carl Dietzsch.

Considérant que la partie supérieure de la masse pèse de tout son poids sur la partie en fusion et la comprime contre la paroi du four, l'obligeant ainsi à s'agglomérer et à se coller contre elle, d'où résultent les inconvénients signalés plus haut, Dietzsch a modifié l'ancien four en y établissant deux zones : l'une formant le réchauffeur, l'autre la zone de cuisson suivie du refroidissement. Il plaça entre les deux une surface légèrement inclinée formant étage qui permit de faire descendre la masse, déjà cuite en partie, dans l'espace réservé à la cuisson proprement dite (creuset). Cette disposition aussi simple qu'ingénieuse atteignit un triple but : le premier fut de débarraser la masse en partie vitrifiée de la charge qui pesait sur elle dans l'ancien four, d'où résultait la possibilité de pouvoir disposer la matière en forme de pyramide, de supprimer par ce moyen la cause principale du collage et en même temps de réaliser les conditions nécessaires à la marche continue du four. En second lieu, on eut dès lors le moyen de surveiller la matière venant du réchauffeur et de se rendre compte de son degré de cuisson, et par suite, de régler l'alimentation du foyer en combustible d'après l'état d'avancement de la cuisson ; en troisième lieu enfin, on eut la possibilité d'utiliser à peu près intégralement les chaleurs perdues du four, qui étaient complètement perdues avec le four à marche intermittente.

Le four à étages (*fig.* 61) se compose de quatre compartiments. A est le réchauffeur, B un orifice permettant de ringarder dans le creuset, C le creuset, D la chambre de refoidissement, E la porte de chargement de la masse humide, F une porte de travail.

La chambre de refoidissement D reçoit le ciment cuit ; elle se rétrécit vers le haut et est surmontée du creuset C qui se trouve un peu en retrait afin que le ciment incandescent puisse descendre en chute libre et sans toucher les parois de la chambre, où il se refroidit suffisamment pour ne pas s'agglomérer.

Le creuset C est voûté et communique avec le canal B muni d'une ouverture pour l'introduction du combutible et d'une ouverture F pour le travail. Les gaz de la combustion passent par ce canal et vont réchauffer la matière humide qui se

trouve dans le réchauffeur A. Lorsque la matière est cuite dans la partie supérieure du creuset, on tire de la chambre de refroidissement une certaine quantité de ciment ; le contenu du four descend et il se produit dans le creuset un vide que l'on comble en y amenant de la pâte prise dans le réchauffeur, et en même temps on ajoute la quantité de combustible nécessaire pour assurer la marche de la cuisson.

La masse préalablement réchauffée et en partie calcinée se trouve placée sur la sole du canal B ; le canal et le réchauffeur sont chargés de matière pour une durée de cuisson de 12 à 24 heures; la moitié ou les deux tiers de la charge sont à l'état incandescent, tandis que la couche supérieure est simplement réchauffée. On a ainsi sur le bord supérieur une réserve de masse fortement réchauffée dont on répartit une certaine quantité sur l'orifice du creuset à intervalles réguliers. Le contenu du creuset ne supporte donc aucune charge et est amené à descendre avant de se solidifier. Ce mouvement de la masse a pour effet de changer souvent la position respective des morceaux qui la composent, et comme le creuset s'élargit progressivement vers le bas, elle perd en s'y solidifiant la propriété de s'agglomérer et de se coller à la chemise du four.

Lorsque les compartiments du four ont les dimensions voulues et qu'on observe exactement les intervalles de temps prescrits pour les différentes opérations, il suffit de surveiller la marche du four pour obtenir une cuisson normale et régulière jusqu'à ce que les briques de la chemise soient usées. Le ciment ne peut s'agglomérer ni s'attacher à la paroi que si l'on abandonne le four à lui-même sans surveillance. On a prévu pour ce cas des ouvertures GG qui, avec l'ouverture de ringardage au-dessus du creuset, rendent toutes ses parties facilement accessibles à l'outil.

Dans l'ordre chronologique et jusqu'à l'époque où l'on a introduit le four rotatif, le four à étages a été le premier four continu réellement utilisable et qui, avec le four circulaire que nous décrirons dans la suite, a eu les plus nombreuses applications dans la fabrication du ciment. La valeur relative de chacun de ces deux systèmes de fours a été l'objet d'études et de discussions approfondies. Comme toujours en pareil cas, les praticiens ont départagé les opinions en présence en démontrant que le four à étages donne d'excellents résultats dans certains cas, et le four

circulaire dans d'autres. Ces deux systèmes, excellents par eux-mêmes, ont d'ailleurs perdu de leur importance depuis l'introduction du four rotatif et du four droit à chargement et vidange automatiques.

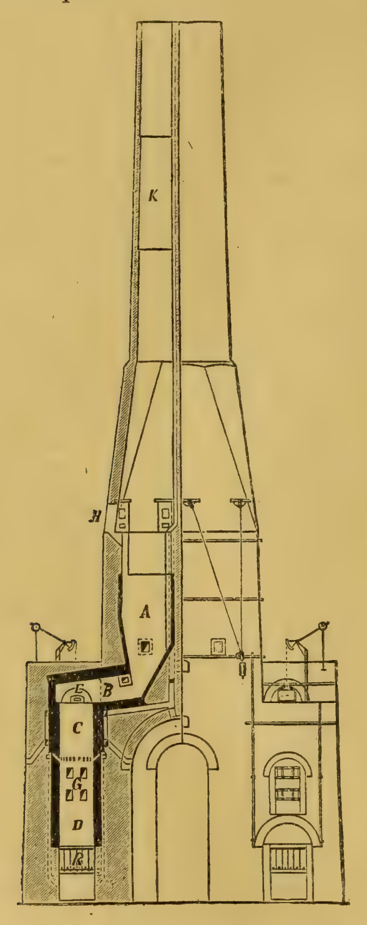


Fig. 61. — Four à étages modifié par Hermann Schmidt

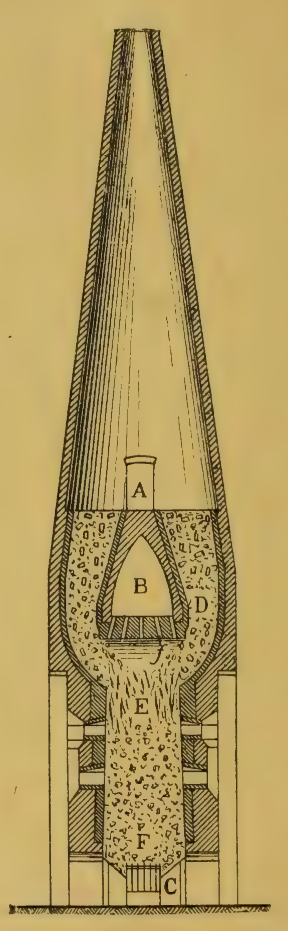


Fig. 62. — Four R

Le rendement d'un four double à étages est de 20.000 kg. de ciment par jour ; mais lorsque les matières mises en œuvre sont faciles à cuire, il est beaucoup plus élevé et peut alors atteindre 25.000 à 27.000 kg. Comme l'utilisation de la chaleur y est parfaite, la dépense de combustible y est peu élevée : elle ne dépasse pas 29 à 34 kg. par baril de ciment, soit 20 % du poids des clin-

kers. Elle peut être diminuée encore par l'emploi du soufflage, etc.

Four à étages modifié par Hermann Schmidt. — Un inconvénient souvent signalé dans le fonctionnement du four à étages et qui pouvait devenir dangereux pour les ouvriers chargés du service, consistait dans le rabattage des flammes et leur sortie par les ouvertures du creuset quand on y chargeait du combustible. Hermann Schmidt à Bonn a apporté à ce four divers perfectionnements destinés à remédier à cet inconvénient.

Pour empêcher absolument la matière de s'attacher aux briques de la chemise du four, on a établi à l'intérieur de la paroi une série de tirages verticaux traversés par l'air entrant par le bas et par des canaux latéraux : ces tirages forment une couche isolante entre la paroi du four et la matière soumise à la cuisson.

Enfin, on a ménagé derrière la chemise isolante du creuset un espace vide dans lequel une série de diaphragmes verticaux forment des chicanes, de telle sorte que l'air froid rentrant par les tirages vienne lécher et refroidir l'intérieur de la paroi.

Certaines matières premières, quoique agglomérées à l'état de pâte humide et bien séchées, ne résistent pas aux manipulations un peu brutales qu'elles subissent dans le four à étages; elles s'émiettent en descendant du réchauffeur dans le creuset et se réduisent en partie en poussière qui vient gêner le tirage. Pour remédier à ces inconvénients, on a apporté à la construction du four différentes modifications.

Le *four « R »* (Risager) (*fig.* 62), est une modification du four Dietzsch; sa caractéristique spéciale consiste dans la disposition du réchauffeur qui est traversé par un passage B, au-dessus du creuset. Comme pour le four Aalborg, le charbon est introduit par des orifices *f* fermés par des couvercles en fonte qu'on enlève pour les besoins du chauffage. La matière agglomérée en forme de briques est chargée en A. Les réchauffeurs D peuvent contenir la matière de 120 barils de ciment; ils communiquent avec le creuset E, dans lequel les matières tombent directement d'elles-mêmes sans l'intervention de l'ouvrier comme dans le four à étages. F est la chambre de refroidissement et C une grille de construction ordinaire.

Une particularité de ce four consiste dans sa grande capacité : le réchauffeur et le creuset peuvent contenir chacun la matière de 500 barils de clinkers, de sorte que ceux-ci séjournent dans la

chambre de refroidissement pendant quatre jours. Les dimensions du four R peuvent donc être beaucoup plus grandes que pour les autres systèmes par suite de la facilité avec laquelle le charbon peut être réparti de la chambre B sur la partie supérieure du creuset E.

Le rendement annuel de ce four s'élève, d'après son inventeur, à 40.000 barils de ciment : la consommation de charbon serait de 25 à 28 kg. par baril (15 à 16 % du poids des clinkers). Le service du four, y compris le chargement, exige trois hommes de jour et trois hommes de nuit.

Le *four Schneider* est représenté par les figures 63 et 64. A est le creuset, B la chambre de refroidissement, C la grille. Le creuset A est surmonté d'une partie conique en tôle D dans laquelle sont ménagées des portes de chargement et qui se prolonge par la cheminée.

Ce four est également à marche continue; il se distingue du four ordinaire moins par sa construction que par son mode de fonctionnement. Le principe appliqué est le suivant : abréger la durée du rechauffage de la matière, diminuer autant que possible la zône de cuisson et isoler soigneusement la chemise en briques réfractaires.

Pour abréger la durée du réchauffage, Schneider soumet à la cuisson la matière presque sèche (sous forme de briques à environ 8 % d'eau) : il la charge en une couche de 1,8 à 2 m. et la fait cuire en un seul bloc capable, par son propre poids, de vaincre la résistance de la masse incandescente qui s'attache aux parois du four. Pour supprimer les collages contre la chemise du four, il garnit celle-ci d'un revêtement de 5 cm. d'épaisseur de briques brutes de même matière que celle soumise à la cuisson; cependant, on néglige le plus souvent cette précaution parce qu'on la trouve inutile.

L'inventeur a complètement renoncé au mode usuel de construction du bâtiment du four : il se contente d'entourer ce dernier, au niveau du gueulard, d'une plateforme fermée de toutes parts et recouverte d'une toiture. Ce procédé permet de réduire considérablement les frais de construction du four, qui revient ainsi à bon marché. Enfin, si l'on considère que ce four peut cuire les briques faites de pâte demi-humide sans séchage artificiel préalable, on est obligé de convenir avec l'inventeur que son sys-

tème est économique tant au point de vue de la construction que du fonctionnement.

Le rendement journalier du four Schneider est d'environ 20.000 kg. de ciment; la dépense de coke, qui est en moyenne de 15 %, descend jusqu'à 11 % du poids du clinker quand on met

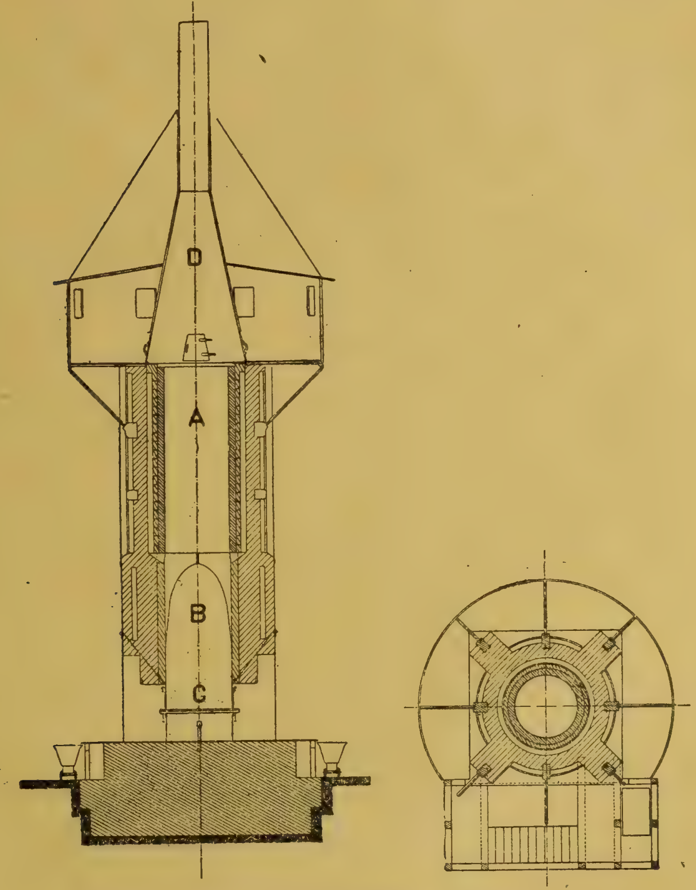


Fig. 63 et 64. — Four Schneider. Elévation et plan

en œuvre de la poudre brute de laitier. En ajoutant le combustible à la matière dès avant le briquetage (en dernier lieu Schneider n'emploie plus exclusivement du poussier de coke ou d'anthracite, mais parfois aussi de la houille de bonne qualité), on obtient du clinker moins dur, analogue à la pierre-ponce, beaucoup plus facile à broyer.

Le procédé employé tout d'abord pour incorporer le combustible à la matière avant le briquetage, consistait à l'ajouter à la poudre brute (sous forme de fines de coke) dans l'auge d'humectation; mais, à défaut d'un dispositif convenable pour l'arrivée régulière de la poudre d'une part et du combustible de l'autre, on était exposé à des surprises désagréables. Pour y remédier, on a adopté pour la confection du mélange de combustible et de poudre brute le procédé représenté par le schéma de la figure 65.

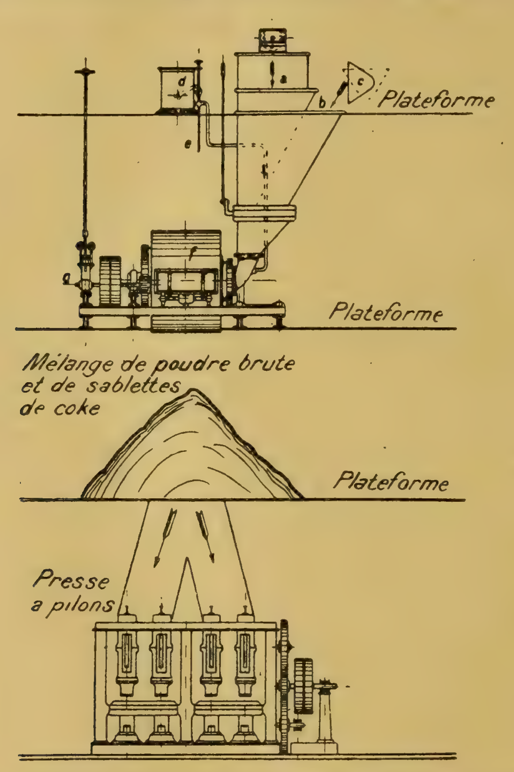


Fig. 65. — Vue d'ensemble de l'installation pour le mélange du combustible avec la poudre brute avant le briquetage

L'installation se compose d'un tambour mélangeur *f* dans lequel on fait arriver à intervalles déterminés une certaine quantité de poudre brute de la caisse *a;* en même temps, on y introduit par *b* une certaine quantité de combustible mesuré à l'aide de la caisse *c*, ainsi que l'eau nécessaire à l'humectation et contenue dans le vase *d*. Ensuite, on imprime au tambour un mouve-

ment de rotation pour la confection du mélange, puis on évacue la matière en actionnant la porte de vidange du tambour de la plateforme supérieure au moyen du dispositif *g*. Le mélange humecté est abandoné à lui-même pendant quelque temps avant d'être soumis au briquetage.

Un tambour d'un diamètre de 1 m. 70 fournit par heure 6 m^3 de mélange; la force motrice nécessaire est très faible.

On obtient par ce procédé une bonne répartition du combustible dans la poudre brute, et ce fait a une grande importance pour la bonne marche de l'usine; c'est tellement vrai qu'une fabrique de ciment, dont la production est de 100.000 barils, aurait réalisé par l'application de ce procédé, une économie de 100 wagons de combustible par an. Ajoutons que ce procédé est adopté maintenant dans toutes les usines qui remplacent le four rotatif par le four droit à chargement et vidange automatiques.



Un défaut commun à tous les fours, de quelque système qu'ils soient, est la difficulté de régler le tirage : on peut le ralentir à l'aide de modérateurs placés dans la cheminée, mais on ne peut l'activer au-delà d'une certaine mesure à l'aide de moyens analogues. On remédie à cet inconvénient par l'emploi de souffleurs de construction spéciale qui, envoyant de l'air dans le four, amènent au combustible la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion plus sûrement que par n'importe quel autre moyen, et permettent d'imprimer à la marche de la cuisson une grande régularité, en affranchissant le fabricant des influences atmosphériques.

La ventilation peut se faire par aspiration ou par injection. Dans l'un et l'autre cas on produit une différence de pression entre l'intérieur du four et l'atmosphère, mais le résultat pratique n'est pas tout à fait le même.

Le fonctionnement correct du four droit exige avant tout que la zone de cuisson et de scorification se maintienne toujours à la même place, ensuite que la matière cuite à point descende périodiquement d'une manière uniforme. Or, l'expérience montre que le tirage par aspiration est plus favorable au maintien de ces conditions que le tirage par injection. Tout d'abord, le fait même que l'air injecté dans le four ne puisse l'être par le centre, mais uni-

quement par les portes latérales, constitue un inconvénient, parce qu'il est impossible dans ces conditions de le répartir uniformément sur tout le diamètre du four. Il s'ensuit que la cuisson manque d'uniformité et que la zône de scorification est exposée à se gauchir. Cet inconvénient est encore aggravé par le manque d'étanchéité des portes de la partie inférieure du four. Il se produit alors des fuites, l'air injecté s'élève d'un côté seulement le long de la paroi, d'où résultent une cuisson inégale et une déformation de la zône de scorification.

Il n'en reste pas moins que, convenablement appliqué, le tirage artificiel par injection d'air dans le bas du four donne de bons

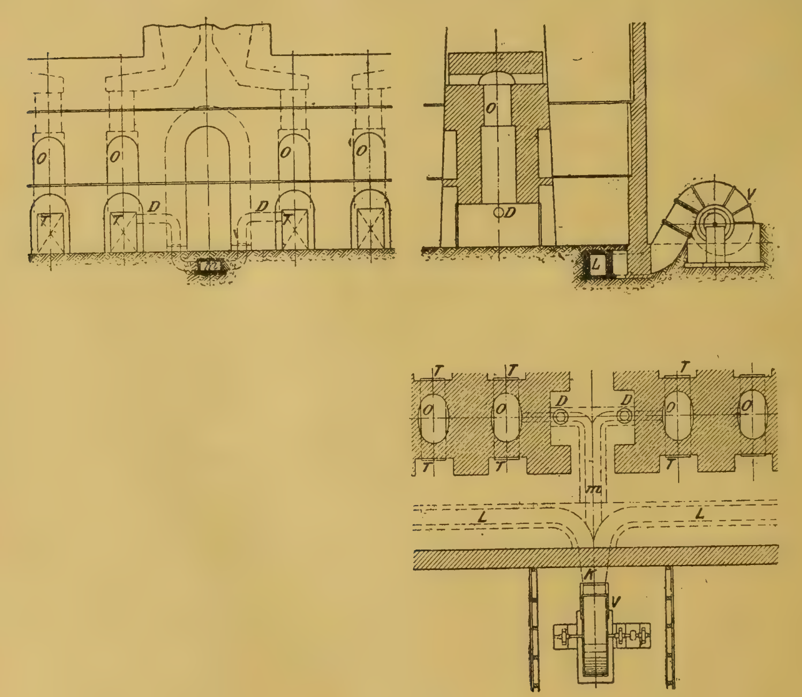


Fig. 66 et 67. — Vue d'une installation de ventilation par injection d'air

résultats. Par ce moyen on arrive jusqu'à doubler son rendement tout en ramenant la consommation du combustible de 18-20 % et plus à 16-18 %, soit une différence en moins de 20 % en quantité ou en qualité.

L'augmentation de rendement du four par l'installation d'in-

jecteurs d'air de construction appropriée, qui n'exige que très peu de force motrice, permet donc soit d'augmenter la production sans augmenter le nombre des fours, soit de diminuer la durée de leur fonctionnement et, par suite, le nombre d'ouvriers pour une même production.

L'installation du tirage artificiel par injection d'air représentée par les figures 66 et 67 est suffisante pour 10 à 12 fours. L'air est refoulé par le ventilateur V dans le canal principal K, de là dans les canaux M et dans les tuyaux DD munis de régulateurs ; de ceux-ci il se rend sous les grilles des fours O fermés par des portes T, puis il passe par la zône de refroidissement où il s'échauffe dans la zône de cuisson et utilise le calorique qu'il a emprunté au clinker.

Les ventilateurs seront actionnés de préférence par moteur électrique alimenté par la station d'éclairage; ils fonctionnent

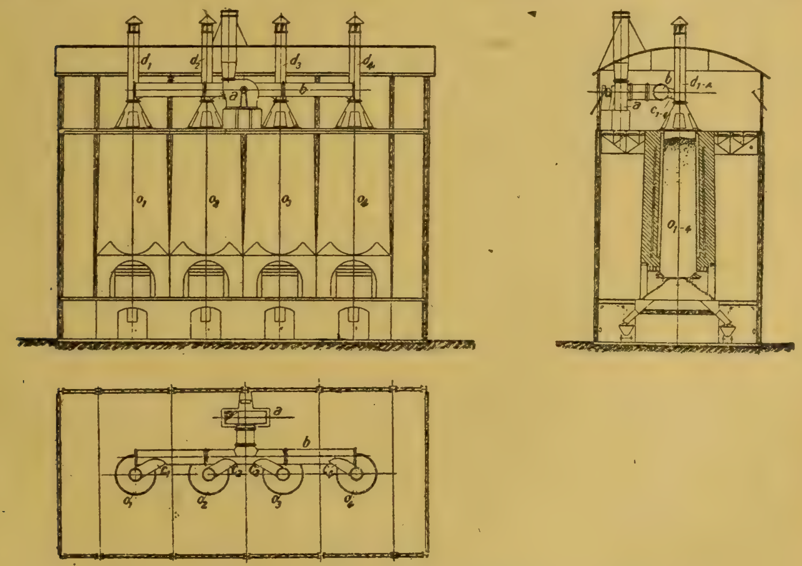


FIG. 68, 69 et 70. — Vue d'une installation de ventilation des fours droits par aspiration

alors d'une manière plus économique que s'ils sont mus par transmisson. Cette méthode, en outre, permet de diminuer la longueur des canalisations et d'affranchir les ventilateurs de la marche des autres machines.

Les figures 68 à 70 représentent le schéma d'une installa-

tion de tirage artificiel par aspiration. *a* est un exhausteur (qui non seulement aspire l'air s'élevant sur les côtés, mais agit uniformément sur tout le diamètre du four), *b* est la conduite générale d'aspiration, c^1-c^4 sont les tronçons de communication avec les quatre tuyaux d^1-d^4 des cheminées et o^1-o^4 sont les quatre creusets des fours. Ces schémas sont assez explicites par eux-mêmes; il suffira de faire remarquer que *c* aussi bien que *d* sont munis de clapets pouvant être actionnés facilement à distance et permettant, au besoin, de fermer la conduite b^1 sur n'importe quel four, comme par exemple pendant le chargement, et de laisser partir librement les gaz de la combustion.

INCONVÉNIENTS DES FOURS VERTICAUX. — MOYENS PROPOSÉS POUR Y REMÉDIER.

Les anciens fours verticaux, de quelque système qu'ils soient ont ceci de commun qu'ils exigent une main-d'œuvre considérable, très coûteuse, fournissent des produits manquant de régularité par suite de l'énorme proportion d'incuits et de surcuits, et enfin donnent lieu à des accidents de fabrication provenant d'irrégularités dans la marche de la cuisson et dans la descente de la masse incandescente.

De sérieux efforts ont été faits dans ces derniers temps pour améliorer cet état de choses. Nous allons passer en revue les mesures préconisées ou adoptées dans ce but.

Pour mettre les fours verticaux à même de donner des résultats aussi bons que ceux du four rotatif, il faut avant tout, comme le fait observer M. Blachier (1), que nous suivrons dans cette étude, modifier le régime de la zône de cuisson.

Or, le régime de cette zône est fonction de trois éléments, savoir : le chargement de la matière première et du charbon, l'aspiration du four et enfin le tirage des produits. Ce sera donc en rendant ces opérations solidaires, comme cela se passe dans le four rotatif, et aussi en les améliorant le plus possible, que l'on obtiendra du four vertical tout ce qu'il peut rendre. A cet effet, on procèdera au tirage des produits en se basant sur l'aspiration du four ou, plus exactement, sur la vitesse d'ascension du feu ; le chargement, à son tour, deviendra fonction de la descente des matières, c'est-à-dire du tirage des produits.

Le rapport des trois principaux éléments de marche du four vertical

(1) Cf *Rev. des Matér. de construction*, juin 1919.

étant ainsi défini et réglé, nous traiterons uniquement du tirage, qui est de beaucoup l'opération la plus défectueuse.

Conditions requises pour l'obtention d'un tirage rationnel des produits. — Dans la masse des produits que contient un four en marche normale on peut distinguer trois zônes différentes, dans lesquelles la matière est à des états distincts. La première est la zône d'allumage : elle comprend tous les produits chargés dans le four et réchauffés progressivement par les gaz de la combustion jusqu'au moment où le tirage les amène à une température suffisante pour déterminer l'inflammation du charbon.

Il y a, en second lieu, la zône de cuisson : elle englobe la masse des produits dans laquelle le charbon est en combustion.

Enfin, il y a la zône de refroidissement, qui comprend les produits depuis le bas du four jusqu'à la zône de cuisson.

Qu'il s'agisse de ciments naturels ou de ciments artificiels, dont la cuisson donne lieu à la formation d'une masse agglomérée d'aspect demi-fondu, le tirage s'opère indifféremment de deux manières invariables : 1° en laissant choir les produits sur le sol et les chargeant à la pelle dans les wagons ; 2° au moyen d'une grille suspendue à une certaine hauteur au-dessus du sol, permettant le remplissage direct du wagon. — Ces deux méthodes, quels que soient les soins apportés dans leur application, manquent de la précision qu'exigerait un tirage rationnel ; celui-ci implique des moyens tels que la descente des matières dans les différentes zônes se fasse toujours par couches horizontales et dans un ordre aussi parfait que possible.

Or, il est impossible de se rendre compte si cette condition est remplie, car on n'a aucun moyen de vérifier si la quantité extraite l'a été également sur toute la surface de la grille ; aussi arrive-t-il souvent que le four se dérègle parce que la zône de cuisson a pris une forme inclinée comme conséquence d'un tirage inégal.

Cette zône, qui doit être parfaitement horizontale, est devenue très inclinée et a même abandonné une partie de la paroi du four, en laissant dans cet endroit libre passage aux produits : ceux-ci éviteront complètement la zône de cuisson et viendront dans le bas du four en l'état où ils ont été chargés, c'est-à-dire incuits et mélangés avec leur combustible.

Les coulées d'incuits ne résultent pas toujours d'un tirage inégal ; il y a d'autres causes, comme par exemple un mauvais chargement des matières premières, un collage à la paroi, une proportion insuffisante de combustible ou même un mauvais état de la chemise réfractaire du four ; mais ces causes, quelles que soient leur influence sur la descente des matières, n'en laissent pas moins subsister les inconvénients d'un tirage irrégulier, auquel ils ne peuvent que s'ajouter.

Il y a enfin comme défaut de principe dans les méthodes employées les variations brusques des positions respectives des différentes zones dans les chutes quelquefois importantes que subit le four au moment de son évacuation.

Quand les produits à extraire ne sont pas agglomérés entre eux, c'est-

à-dire que leur tirage est facile, cet inconvénient peut être en partie supprimé, si l'ouvrier tire le four régulièrement, très souvent et par petites quantités égales de façon que les zones ne changent pas de place au fur et à mesure que l'aspiration du four et la combustion qui en résulte, tente de les élever.

Mais quand les produits à extraire d'un four sont agglomérés en masse compacte et dure formant « bouchon », le tirage devient parfois très difficile et l'expérience a prouvé que, quelle que soit la puissance des moyens utilisés pour pratiquer la désagrégation de ce bouchon, le four baisse par quantités irrégulières et parfois très importantes, qui ébranlent la masse et provoquent des couloirs d'incuits.

Dans ces mouvements les différentes zones subissent des variations très sensibles de température au détriment de la cuisson ou de la quantité de combustible employé.

Deux cas peuvent se produite : 1° le tirage n'est pas fait à temps et alors la zone de cuisson monte jusqu'au sommet du four au détriment de la zone d'allumage ; 2° au moment du tirage l'écroulement de la masse des matières a amené la zone de cuisson au-dessous de sa position normale avec allongement de la zône d'allumage.

Ces deux situations de la zône d'allumage sont également défavorables. Lorsque le feu est trop haut, les matières premières viennent très rapidement dans la zône de cuisson et les gaz de la combustion s'échappent à haute température en ne cédant qu'une faible quantité de calories à la zône d'allumage.

Si, au contraire, la zône de cuisson est descendue trop bas, elle s'est trouvée brusquement en contact avec une partie plus froide du four et lui a abandonné de la chaleur au détriment de la cuisson. Il peut en résulter des incuits sur les bords et, comme autre conséquence, des couloirs ; mais de toute façon, dans les deux cas cités, ces variations se traduisent par une perte de combustible.

Quand les matières à cuire sont d'une faible dureté, comme les briques agglomérées pour la fabrication du ciment artificiel par exemple, une zône d'allumage trop longue a encore l'inconvénient de provoquer, par son propre poids, l'écrasement des couches inférieures de cette zône, d'où résulte une obstruction pour l'aspiration du four et, de ce fait, un ralentissement de production et une combustion défectueuse.

Il y aurait encore d'autres défauts à citer quand l'extraction des produits se fait d'une façon irrégulière ; mais il suffit de signaler les principaux pour montrer la nécessité de recourir à des appareils donnant plus de garanties que ceux actuellement employés.

Une constatation indiscutable, qui prouve que le tirage amène des perturbations dans la combustion, est faite expérimentalement dans plusieurs usines de l'Isère qui fabriquent les ciments naturels les plus réputés.

Ces usines font, en principe, deux sortes de ciments : le ciment Portland et le ciment prompt. Ces deux qualités sont obtenues avec la même pierre, il n'y a que le degré de cuisson qui diffère. La cuisson s'effectue

dans des fours verticaux ordinaires, et c'est après la cuisson que les produits sont triés : les roches surcuites constituent le Portland, la poussière et les mal cuits forment le prompt.

On obtient ainsi en marche normale environ moitié de chaque qualité, mais si à un moment donné les besoins commerciaux réclament une plus grande quantité de Portland que de prompt, on est obligé de recourir au moyen suivant : les mêmes fours qui servent habituellement, et qui sont des fours continus, sont chargés et traités en fours intermittents. Avec cette marche le mélange tout venant tiré des fours devient uniquement du Portland, il n'y a plus de ciment prompt, autrement dit plus de pierres mal cuites qui seraient des incuits s'il s'agissait d'autres qualités de ciment.

Voilà donc une preuve qui montre bien l'amélioration de cuisson qui se manifeste nettement quand un four marche sans extraction, c'est-à-dire sans avoir à subir tous les inconvénients cités précédemment, qui amènent des perturbations dans les différentes couches et font que certaines d'entre elles subissent mal ou pendant un temps insuffisant l'action de la cuisson.

Pour remédier aux inconvénients qu'il vient de signaler, notamment aux collages et aux irrégularités de la cuisson qui résultent de la descente inégale de la masse incandescente dans le four, M. Blachier préconise un système de grille tournante, ce qui dénote un progrès, et l'emploi d'un système d'aiguilles traversant la paroi du four et permettant de retenir, le cas échéant, les coulées d'incuits qui pourraient se produire, ce qui n'est pas un progrès mais un simple moyen de fortune. La vraie solution de la question est ailleurs : elle réside dans le fonctionnement automatique du four qui permet de réduire la main-d'œuvre à sa plus simple expression, dans l'intensification de la cuisson au moyen de la ventilation artificielle par injection et au besoin par aspiration, et sa régularisation par la continuité du tirage au moyen de grilles tournantes bien comprises : toutes conditions auxquelle répondent pleinement queques-uns des nouveaux systèms de fours que nous allons décrire.

FOURS A GRILLE TOURNANTE ET VIDANGE AUTOMATIQUE

C'est en 1913, à l'assemblée des fabricants de ciment allemands, que fut mentionné pour la première fois le four vertical à grille tournante, et ce n'est pas sans une forte dose de scepticisme que les constructeurs de fours rotatifs accueillirent la communication qui fut faite à ce sujet. Or, nous assistons actuellement à un sin-

gulier renversement d'une situation que, il y a peu d'années encore, on croyait définitivement acquise : il suffit de constater que, actuellement, il n'y a pas un constructeur de machines pour ciment qui ne s'occupe de la construction de dispositifs de vidange automatique du four à cuve.

Nombreux sont les brevets qui, depuis quelques années, ont été délivrés pour la construction de ces sortes de dispositifs, et leur description occuperait à elle seule tout un volume. Aussi nous bornerons-nous à une analyse rapide des divers systèmes qui ont été préconisés ou sanctionnés par la pratique industrielle.

La Société *Amme* (fig. 71) (1) a fait breveter un dispositif composé de deux cylindres concasseurs hérissés de pointes rangées hélicoïdalement, quoique d'une manière irrégulière, dans le but manifeste d'imprimer au bloc incandescent du four un mouvement de rotation autour de son axe vertical. Il est permis d'émettre des doutes sur l'efficacité de ce concept des inventeurs, ce qui d'ailleurs n'enlève rien à l'intérêt qui s'attache à leur dispositif de vidange. Ils réalisent le chargement automatique du four en faisant tomber les briques de poudre crue sortant de la briqueteuse directement sur une courroie de transport qui les élève jusqu'à l'orifice de chargement du four et les y déverse à l'aide d'une trémie de construction spéciale.

Dans le même but, *Thiele* (fig. 72) (2) a construit une grille composée de deux éléments formés de barres en acier hérissés de pointes, qui se meuvent alternativement dans un même plan horizontal et produisent de la sorte un cisaillement qui a pour but de diviser le bloc incandescent descendant dans le four. Les deux moitiés de la grille se meuvent lentement sur leurs chariots l'une à côté de l'autre, et dans ce mouvement leurs pointes cisaillent le contenu du four. Les clinkers tombent par les interstices des barres et sont évacués de la manière habituelle. Les chariots de la grille sont actionnés chacun à l'aide d'un tirant qui émerge de la maçonnerie du four et qui est enfermé dans un carter destiné à le protéger contre l'action des clinkers et de la poussière. Le mouvement est transmis aux deux moitiés de la grille par un arbre commun, agissant sur deux hélices dont l'une tourne à droite, l'autre à gauche. Un dispositif spécial permet de régler la vitesse et l'amplitude du mouvement de la grille suivant

le rendement à obtenir. Le four Thiele travaille également avec injection d'air qu'on envoie dans la trémie située sous la grille.

Polysius (fig. 73) (3) a fait breveter un dispositif consistant en une cuvette tournant sur galets sous l'orifice du four, dans laquelle

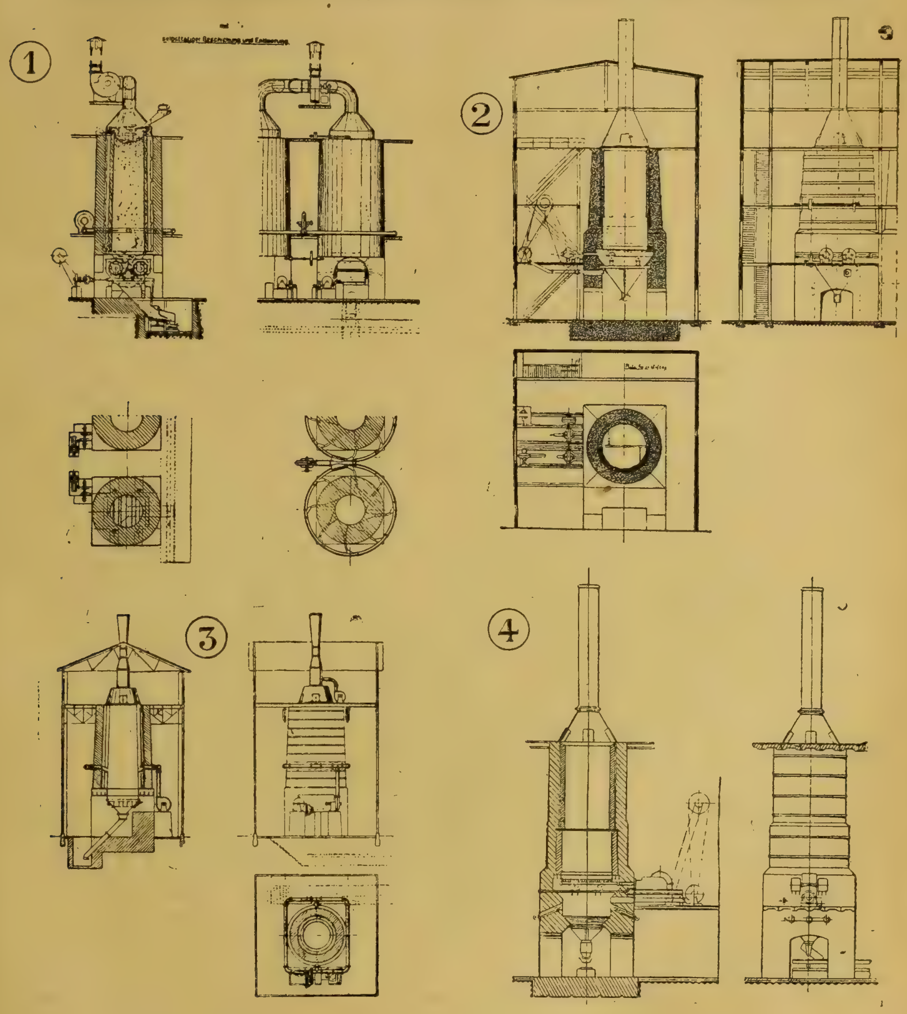


FIG. 71, 72, 73 et 74. — (1) Four Amme. — (2) Four Thiele. — (3) Four Polysius. — (4) Four Fellner et Ziegler

est disposée une grille formée de barres garnies de pointes ; ces barres rayonnent du centre vers la circonférence, les fentes entre les barres s'élargissent vers le centre ; la vitesse de rotation de

la grille diminuant vers le centre, a pour effet d'uniformiser la vidange sur tout le diamètre du four et d'imprimer une plus grande régularité à la marche de la cuisson et à la descente de la masse. Les dents de concassage de la grille ont une direction opposée et sont inclinées dans le sens du mouvement de rotation, de manière à saisir la matière sur tout le diamètre du four et à la diviser. La cuvette est actionnée par une roue à hélice qui reçoit le mouvement au moyen d'une paire de roues coniques.

La cuvette est prémunie contre tout déplacement latéral au moyen de galets de soutènement. Elle ferme hermétiquement d'une part avec la garniture fixe du four, de l'autre avec la trémie de vidange qui est disposée en-dessous, de manière à éviter les fuites d'air d'injection et le dégagement de la poussière. Ce dispositif de vidange peut être retiré de dessous le four sans qu'il soit nécessaire d'entamer la maçonnerie. La fig. 75 donne une

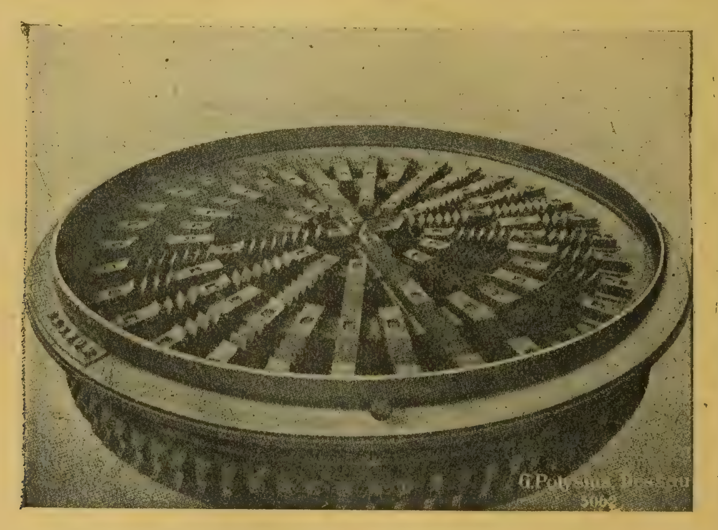


Fig. 75. — Grille tournante de Polysius

vue de l'installation dans laquelle le revêtement en fonte du four, que l'on fixe sur la maçonnerie après le montage de la grille, est posé sur cette dernière.

La matière incandescente tombant à travers les fentes de la grille, est évacuée périodiquement par la trémie de vidange dont on règle l'ouverture par la manœuvre d'un registre. L'air néces-

saire à la combustion est injecté au-dessus de la grille au moyen de tuyères reliées à un ventilateur à haute pression. Les gaz de la combustion se dégagent par la cheminée, dont le tirage est encore renforcé au moyen d'un ventilateur que l'on voit sur la plateforme de chargement.

Dans le four *Mannstaedt*, la grille (fig. 76) est construite d'après les données du brevet Harry-Stehmann : elle se compose d'un assemblage de cinq cylindres concasseurs de 40 cm. de diamètre, garnis de dents et disposés sous le four. Ces cylindres sont actionnés par des roues hélicoïdales qui reçoivent le mouvement d'un arbre commun. Les clinkers détachés du bloc incandescent

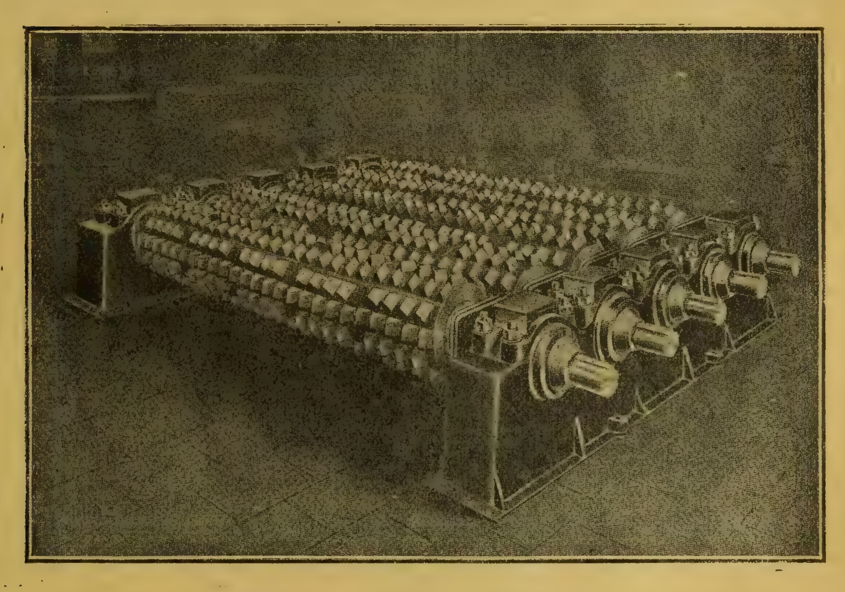


Fig. 76. — Grille de Mannstaedt

par les cylindres tombent à travers les fentes de la grille dans une trémie qui les évacue automatiquement. Les coussinets et les organes de transmission sont enfermés dans un carter et mis ainsi à l'abri de la poussière.

Le four est muni de ventilateurs d'aspiration et de refoulement. En dernier lieu, on a monté sur la trémie de vidange des soupapes en forme de cloches destinées à empêcher les fuites d'air injecté ; ces soupapes sont actionnées par le mécanisme de la grille. L'air nécessaire à la combustion est injecté au-dessous de la

grille et passe à travers les fentes de celle-ci pour se répandre sur tout le diamètre du four.

La méthode de cuisson revendiquée dans le brevet de cette forme vaut d'être mentionnée. Elle consiste à précipiter la poussière soulevée par le courant d'air injecté au moyen d'une série de pulvérisateurs d'eau sous pression, installés sous la grille. L'eau, en outre, produit l'extinction des clinkers et rafraîchit la grille. Enfin, la vapeur d'eau ainsi produite aurait pour effet d'activer le départ de l'acide carbonique et de procurer une meilleure utilisation du combustible. Ce système de vidange n'a pas eu d'applications à l'usine.

La maison *Löhnert* a préconisé pour la vidange automatique du four un système assez curieux : celui-ci consiste à combiner le broyeur conique (décrit dans cet ouvrage, p. 90) avec le four vertical et à créer ainsi un mécanisme susceptible de fonctionner convenablement, à la condition toutefois qu'on adopte les mesures nécessaires pour obtenir une étanchéité parfaite évitant tout dégagement de poussière. Nous ignorons si ce procédé a eu des applications.

Nous terminerons cette énumération par la description des deux systèmes de fours qui nous intéressent plus particulièrement, eu égard à leurs nombreuses applications dans les usines françaises.

Four à cuve à enfournement et vidange automatiques, système Steiger, construit par la Société des Ateliers d'Arlod

La Société des Ateliers d'Arlod qui, depuis de nombreuses années, s'était spécialisée dans la construction des fours à cuve pour la fabrication du ciment Portland naturel et artificiel, s'est préoccupée dès avant la guerre de trouver un système de four réunissant à la fois les avantages de l'ancien four à cuve et ceux du four rotatif. Après de longues expériences et de patientes recherches, elle a trouvé la solution du problème dans le système de four inventé par M. Steiger, représenté par les figures 77 à 80.

Voici brièvement exposée l'économie de ce système. La matière crue et le combustible sont mélangés à l'aide d'appareils spéciaux, dans des proportions toujours constantes, déterminées dans chaque cas particulier. Le mélange est conduit automatiquement à la presse qui le réduit en briquettes ; celles-ci sont

évacuées directement par la presse elle-même et pousées les unes par les autres jusqu'au gueulard du four sans aucune manutention et sans le secours d'aucun appareil. Les briquettes enfournées sont distribuées également sur toute la surface de la cuve à

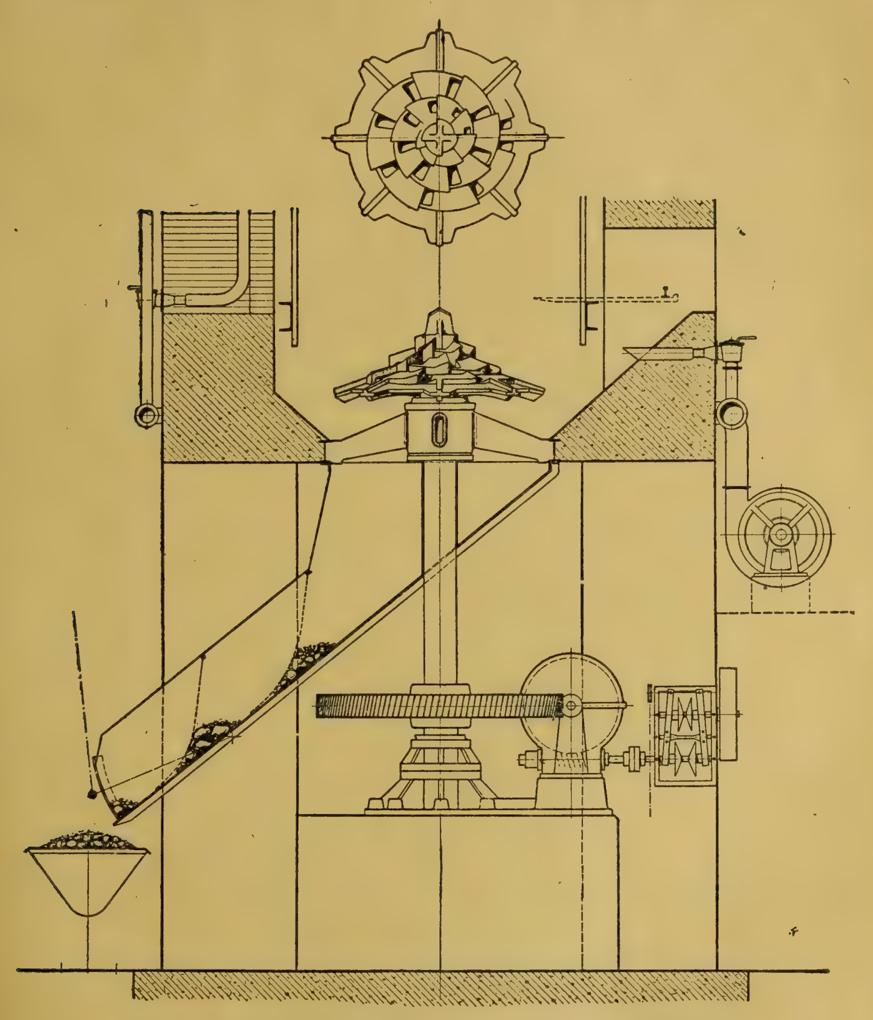


Fig. 77. — Sole tournante syst. Steiger pour la vidange automatique du four droit

l'aide d'un système de répartition très simple, breveté. La cuisson s'effectue de la même manière que dans les anciens fours à cuve, avec cette différence qu'elle est considérablement in-

tensifiée et régularisée par un système spécial de ventilation. Ces innovations exercent une heureuse influence sur la qualité des clinkers et sur la facilité de leur broyage. Le défournement est effectué au moyen d'une sole tournante brevetée, qui brise le bloc incandescent au fur et à mesure de sa descente dans le four : les clinkers même les plus résistants sont réduits à la grosseur du poing et tombent dans une trémie de vidange qui supprime tout dégagement de poussière.

En marche normale, la sole tournante travaille sans interruption ; il s'ensuit que le contenu du four est maintenu en mouvement constant, ce qui a pour effet de rendre pratiquement impossible le collage des clinkers aux parois du four. D'autre part, le mouvement de la sole exerce une influence considérable sur la cuisson elle-même, en brisant le bloc incandescent et y formant des crevasses qui permettent à l'air nécessaire à la combustion d'arriver jusqu'au centre du four, d'où résulte une cuisson uniforme sur toute la surface.

La sole tournante ne fait que quelques tours à l'heure ; elle n'exige que très peu de force motrice et ne subit qu'une usure excessivement faible.

Si, pour une cause quelconque, la force motrice venait à manquer pour un temps plus ou moins long, la marche du four n'en serait pas arrêtée, et on pourrait sans inconvénient continuer le défournement à la main grâce à la disposition spéciale du four, et éviter ainsi le collage aux parois qui serait occasionné par l'arrêt du fonctionnement.

Avec ce système de vidange, un four de 2 m. 50 peut produire jusqu'à 50 t. de ciment par jour.

La grande régularité imprimée à la cuisson permet non seulement l'utilisation la plus complète de la valeur calorifique du combustible, mais encore elle donne la possibilité d'en employer n'importe quelle sorte qui ne soit pas trop riche en matières volatiles. On a dès lors le moyen de tirer parti de qualités de combustibles qui étaient inutilisables auparavant, telles que l'anthracite de qualité inférieure à 30 % de cendres, des déchets de coke, des escarbilles de locomotives, etc. En l'état actuel de pénurie, c'est là un avantage immense qui sera vivement apprécié.

A cette économie sur la qualité vient s'ajouter une économie sur la quantité : dans ce système de four, en effet, la consomma-

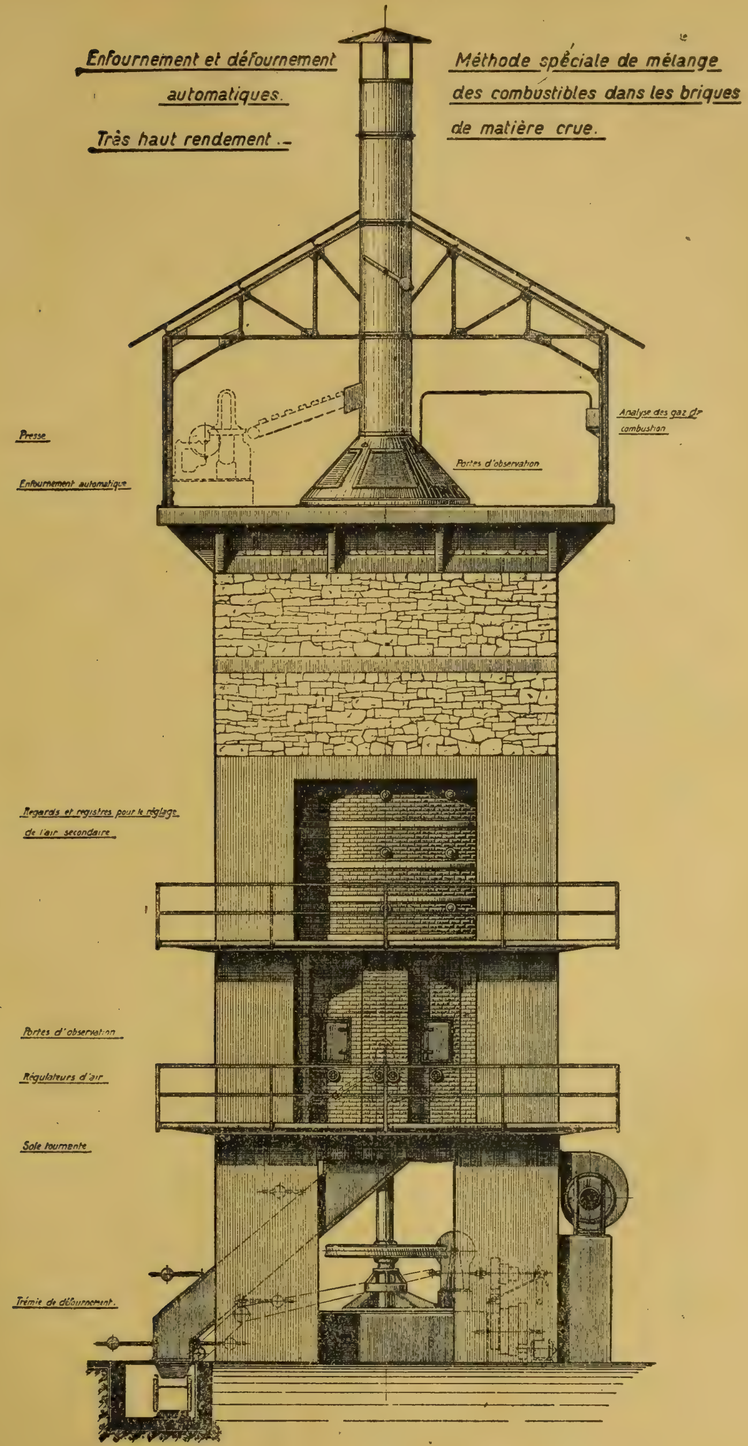


Fig. 78. — Four à chargement et vidange automatique
syst. Steiger (vue antérieure)

tion de combustible de bonne qualité courante est réduite à 15-16 %. Ce chiffre n'a rien qui doive étonner, il est dû à l'injection dans la zône de combustion d'air préalablement rechauffé par un système très ingénieux de récupération des chaleurs perdues du four.

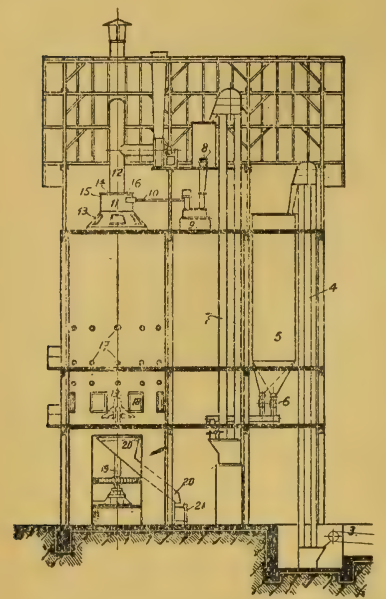
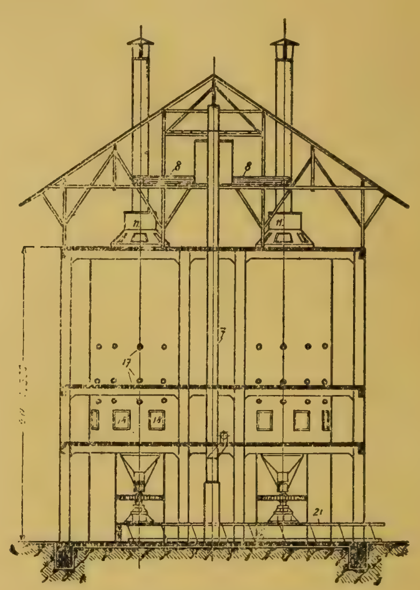



Fig. 79 et 80. — Four Steiger. Vues en coupes longitudinale et transversale

1. Arrivée de la matière première.
2. Trémie pour la matière première.
3. Arrivée du charbon.
4. Elévateur pour le charbon.
5. Trémie pour le charbon.
6. Appareils de dosage pour charbon et matière première.
7. Elévateur pour matière mélangée.
8. Malaxeurs.
9. Presse.
10. Transport automatique des briques.
11. Enfournement automatique.
12. Cheminée.
13. Portes d'observation.
14. Sonde de contrôle.
15. Analyse des gaz de combustion.
16. Thermomètre.
17. Regards etregistres pour le réglage de l'air secondaire.
18. Portes d'observation.
19. Sole tournante.
20. Trémie de défournement.
21. Transport des clinkers.

La question de la main d'œuvre a pris depuis la guerre une importance égale à celle du combustible. L'emploi du four à marche automatique permet de la résoudre en la réduisant à sa

plus simple expression : pour une installation de deux fours, un seul ouvrier suffit pour la surveillance de la cuisson ; le service de la presse à briques n'exige également qu'un seul ouvrier.

Les clinkers produits dans le four Steiger, grâce à leur structure moins compacte, sont beaucoup plus faciles à moudre que ceux du four rotatif : on a constaté que pour ces clinkers le rendement des appareils de mouture peut être augmenté dans une proportion allant juqu'à 50 %. Le ciment obtenu est de très bonne qualité et convient parfaitement pour les travaux hydrauliques. Le fabricant possède d'ailleurs tous les éléments nécessaires pour faire varier sa composition dans certaines limites suivant l'emploi auquel il les destine.

Tous les appareils et les parties métalliques nécessaires pour le four Steiger sont construits par les Ateliers d'Arlod (Ain). La même maison construit également des fours plus simples, à marche non automatique, pour la fabrication des ciments Portland naturel et artificiel.

Four droit à enfournement et vidange automatiques, système Buhler

Parmi les systèmes de fours à enfournement et défournement automatiques qui ont fait leurs preuves, les fours brevetés « Buhler » présentent un intérêt tout particulier. La maison Buhler Frères à Uzwil (Suisse), après de nombreuses études, s'est arrêtée à un type de four vertical qu'elle construit pour des diamètres de 2 m. 50 jusqu'à 3 m. 50. Ces fours présentent les particularités suivantes :

La matière crue est chauffée et refroidie très rapidement, de sorte que la qualité du ciment se rapproche beaucoup de la qualité obtenue dans les fours rotatifs ; on sait en effet que pour obtenir un ciment de qualité supérieure, il faut tout spécialement que le refroidissement des clinkers s'effectue très rapidement. La figure 81 représente une coupe en élévation et une coupe en plan du four système Buhler. Comme on peut le voir par l'examen de cette figure, la cuve du four se compose de deux parties cylindriques d'un diamètre différent, la partie inférieure étant d'un diamètre plus grand que la partie supérieure.

Suivant la production à atteindre et par conséquent aussi suivant le diamètre du four, la maison Buhler applique le tirage par simple aspiration à la partie supérieure du four ou à la fois par

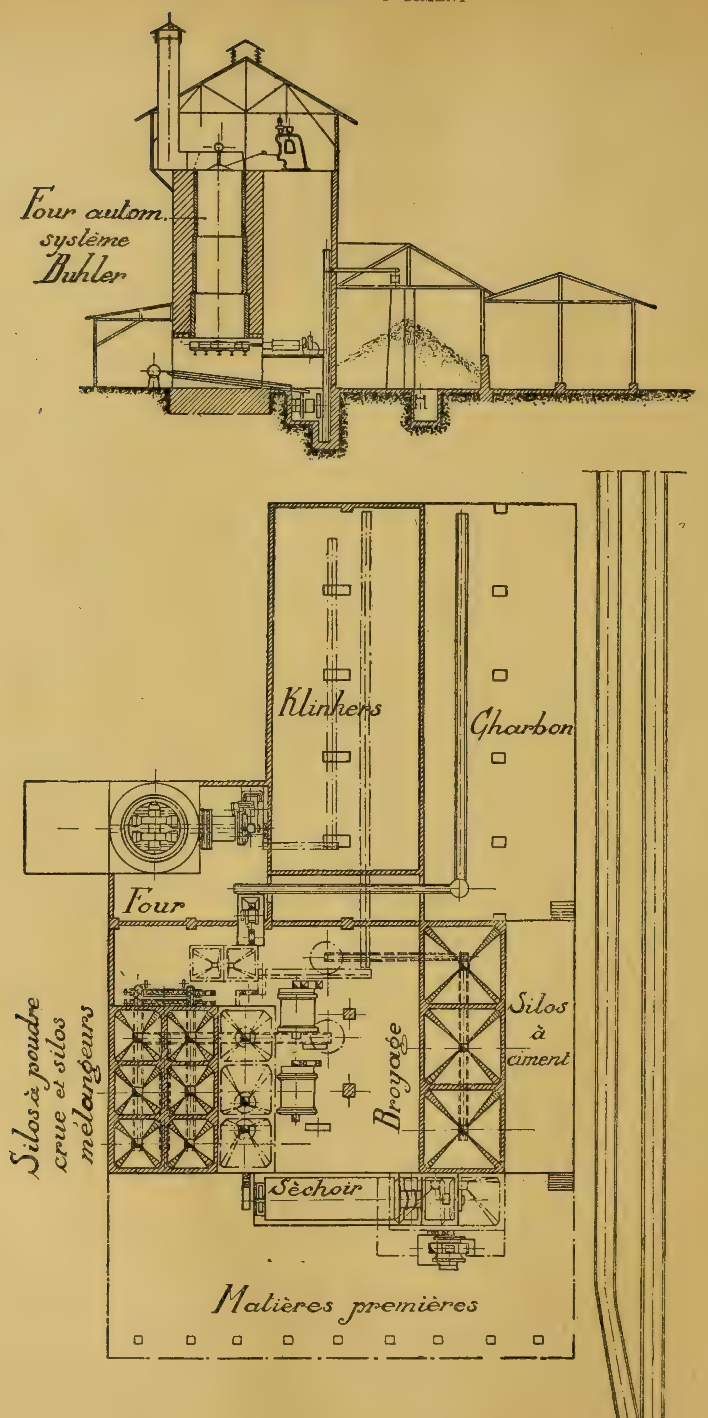


Fig. 81. — Vue d'une fabrique de ciment à alimentation et vidange automatiques du four, système Bühler. Elévation et plan

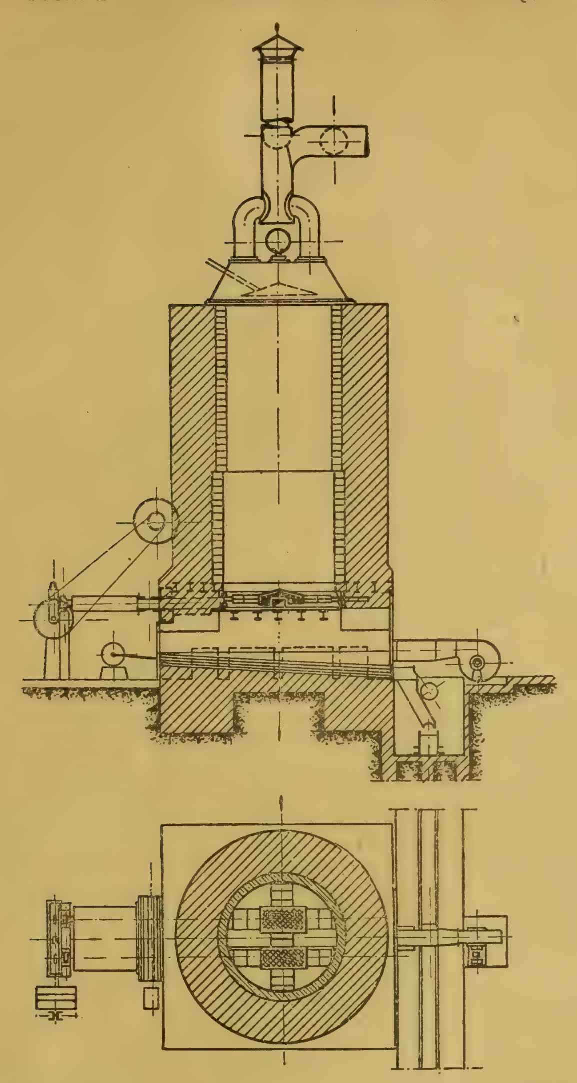


Fig. 82 et 83. — Vue schématique du système de vidange automatique, système Bühler. Elévation et plan

insufflation et aspiration. L'insufflation se fait, suivant le genre de matières premières à traiter, soit directement en dessous de la grille, soit en dessous de la zône de combustion ; cette dernière disposition est surtout appliquée quand il s'agit de matière provoquant facilement des collages et quand on veut refroidir la chemise réfractaire.

Le four est muni à sa partie supérieure d'un appareil de chargement qui distribue automatiquement les briquettes de poudre crue en six points de la section du four.

Grâce à un dispositif spécial, on peut régler la distribution des briquettes de manière à ce qu'elle s'effectue davantage sur un point que sur un autre de la section du four.

Les briquettes sont généralement produites au moyen de presses à genouillère, modèle T. A., système Buhler, que nous avons mentionnés au chapitre « briquetage ». Les dites presses sont gé-

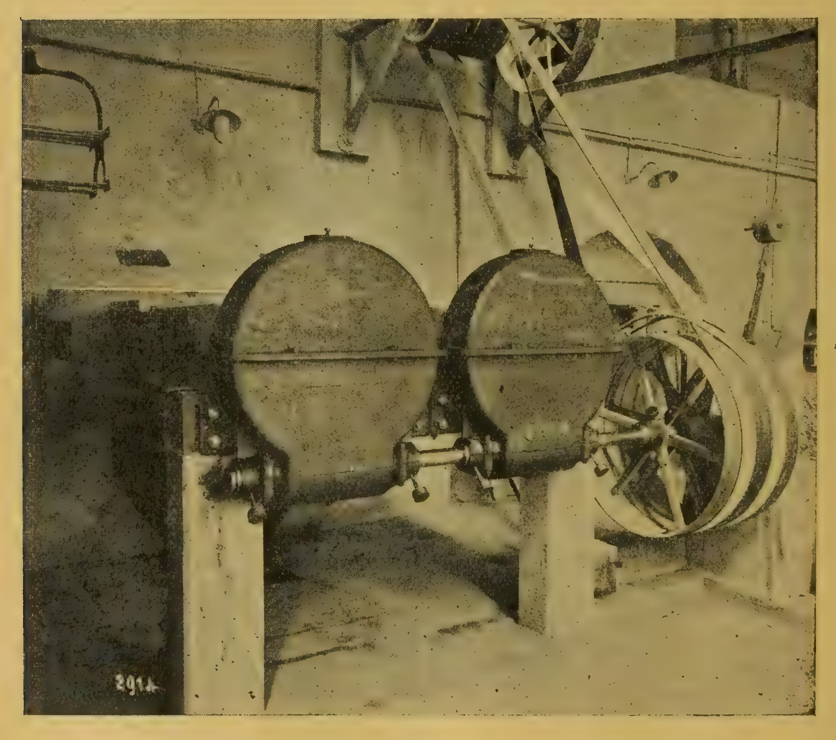


Fig. 84. — Dispositif de vidange automatique, système Bühler. Vue de face

néralement disposées sur la plate-forme du four, à proximité du gueulard, de sorte qu'elles alimentent automatiquement l'appareil de chargement. Les briquettes de poudre crue, dans lesquelles sont incorporées les quantités de fines de charbon nécessaires à la cuisson, une fois chargées dans les fours par l'appareil automatique de chargement, descendent lentement au fur et à me-

sure de la cuisson. Dans ce mouvement de descente, elles sont tout d'abord réchauffées graduellement par les gaz de la combustion, puis elles passent dans la zône de scorification.

L'air nécessaire à la combustion traverse le four en sens inverse de la marche des briquettes, c'est-à-dire de bas en haut ; il est

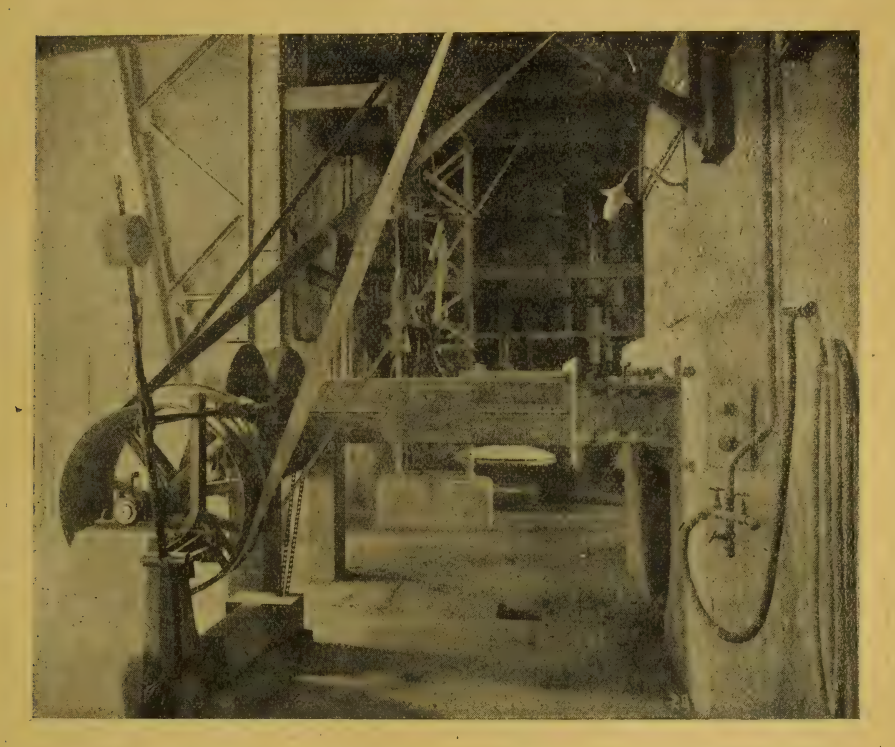


Fig. 85. — Dispositif de vidange automatique, système Bühler. Vue de profil

donc tout d'abord réchauffé par les clinkers sortant de la zône de scorification, de sorte qu'il pénètre dans celle-ci à une haute température. Les gaz produits par la combustion abandonnent dans leur marche ascensionnelle leur calorique aux briquettes de poudre crue qui se trouvent au-dessus de la zône de scorification ; la chaleur produite fournit donc un maximum d'effet utile et son utilisation semble plus parfaite que celle obtenue dans les fours rotatifs où les gaz de combustion n'ont pas de contact intime avec la matière à scorifier, mais, au contraire, traversent un tube

dans lequel cette matière occupe seulement une infime partie de la section.

Les clinkers obtenus sont évacués du four continuellement et automatiquement au moyen de l'appareil de défournement, système Buhler, qui est la partie la plus ingénieuse du four de cette maison.



Fig. 86. — Four défourné à la main. Usine de ciment de Liesberg (Suisse)

Le principe qui a guidé le constructeur dans l'établissement de cet appareil est le suivant :

Pour obtenir une descente régulière de toute la masse dans le four, il ne faut pas tirer également dans toutes les parties de la section du four. En effet, étant donné les frottements qui se produisent le long de la chemise, il est absolument nécessaire, pour obtenir une descente régulière, de produire une évacuation plus importante dans certaines zônes de la section du four. Ce principe a été réalisé de la manière suivante :

A la partie inférieure du four Buhler est disposée une grille fixe, construite au moyen de poutrelles et de rails ; sur cette grille glisse un poussoir de forme particulière, muni sur certains points d'une puissante cuirasse dentée. Ce poussoir est animé d'un mouvement de va et vient très lent qui lui est transmis par un mécanisme de vis sans fin combiné avec de puissantes

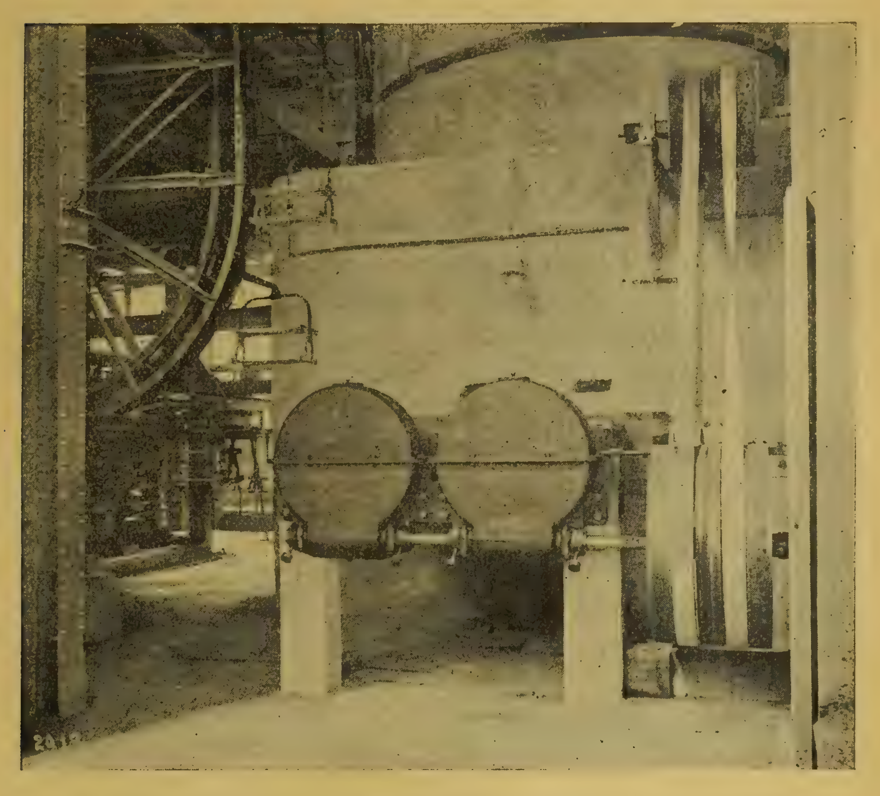


Fig. 87. — Fours munis du défournement automatique système Bühler Usine de ciment de Liesberg (Suisse)

vis motrices actionnant des écrous de forme particulière fixés au poussoir.

La forme du poussoir a été étudiée de façon à réaliser le principe énoncé plus haut, à savoir que pour obtenir une descente régulière de toute la masse, dans certaines parties de la section, l'évacuation doit être plus forte que dans d'autres.

La marche du poussoir est automatique et le clinker est évacué d'une manière continue, ainsi que nous l'avons dit plus haut.

La course du poussoir peut être variée à volonté suivant la production qu'on veut obtenir du four, et un dispositif très simple assure automatiquement, en fin de course du poussoir, le renversement du sens de marche. Tous les organes de commande et le dispositif de débrayage sont enfermés dans des carters, de sorte qu'ils sont à l'abri des poussières.

Les clinkers sont recueillis à la partie inférieure du four par une rigole à secousses qui les distribue au collecteur général des clinkers.

La production des fours Buhler varie suivant leur diamètre, de 35 à 50 tonnes et la consommation de combustible est de 90.000 à 100.000 calories par 100 kg. de ciment, ce qui correspond à une dépense d'environ 16 à 17 % en poids quand il s'agit de fines de coke.

Les figures n°s 82 et 83 représentent deux vues de l'appareil de défournement automatique Buhler. Cet appareil peut être appliqué sur des fours existants, car son installation ne nécessite pas une très grande hauteur en dessous de la grille. L'application de l'enfournement et du défournement automatiques a permis de réaliser dans certaines usines une augmentation considérable de la production et d'éviter complètement les collages.

La maison Buhler frères a réalisé, depuis plusieurs années, un grand nombre d'installations de ces appareils de défournement automatique en France. Elle construit elle-même dans ses propres ateliers tous les appareils nécessaires pour la fabrication du ciment.

Observations générales sur les nouveaux fours à marche automatique

Le rendement du four à cuve varie, on le sait, suivant la nature des matières premières, leur composition chimique et leurs propriétés physiques. Les matières rocheuses, dont la proportion varie considérablement dans le mélange des matières premières et qui n'ont qu'une faible plasticité, donnent des briques friables, exposées à s'effondrer ; dès lors elles ne donneront jamais complète satisfaction, et c'est précisément là une des raisons qui expliquent les différences de rendement que l'on constate d'une usine à l'autre.

Mais, il est hors de doute que si l'on renforce le tirage par la ventilation et si l'on évacue régulièrement les clinkers, on arrive

à augmenter le rendement du four. En outre, grâce à la vidange automatique, on réussit à améliorer sensiblement la qualité des clinkers par une cuisson plus rapide et par la descente régulière et uniforme du bloc incandescent.

Quoi qu'il en soit, la dépense de combustible des fours verticaux à vidange automatique sera toujours plus faible que celle des fours rotatifs. Dans l'ancien four droit, la cuisson du ciment exige en chiffre rond 20 % de fines de coke ramené au poids du clinker, avec légères variations suivant la nature des matières premières. L'installation de la vidange automatique avec injection d'air par le bas permet de diminuer la dépense de combustible de 2-3 %. Il y a donc là une économie réelle par rapport à la cuisson dans le four rotatif où la dépense de combustible varie de 28 à 32 %.

En temps normal, l'emploi des fines de coke présentait en outre cet avantage de coûter beaucoup moins cher que la houille. Mais cet avantage n'existe plus maintenant à la suite de la guerre, car les fines de coke se vendent sensiblement au même prix que la houille.

La dépense de force motrice est également plus faible pour le four vertical à vidange automatique que pour le four rotatif. Comme la préparation des matières premières reste la même pour les deux systèmes de fours jusqu'au briquetage pour le four droit et l'enfournement pour le four rotatif, il convient de comparer la dépense de force des deux systèmes jusqu'au moment où le clinker est évacué du four. On a donc, pour le four vertical : la confection du mélange de poudre brute et de combustible au moyen de vis mélangeuses ou de tout autre système approprié, la confection des briques, l'actionnement des ventilateurs et de la grille tournante ; pour le four rotatif : le séchage et la mouture de la houille et l'actionnement du four, et le malaxage des boues dans le procédé humide.

On a essayé d'établir une relation exacte pour les deux systèmes de fours, mais on a dû y renoncer parce que les conditions de fonctionnement diffèrent tellement d'une usine à l'autre qu'il est impossible de formuler des chiffres exacts. De toute façon, cependant, il serait téméraire d'attribuer une importance exagérée à l'économie de force motrice réalisée par sac de ciment. Il est certain aussi que le four droit à grille tournante exige un

peu plus de main-d'œuvre que le four rotatif lorsque celui-ci est de grandes dimensions : cependant la différence est négligeable.

En définitive, l'introduction de la vidange automatique au moyen de la grille tournante constitue une réelle amélioration dans le fonctionnement du four droit ; en même temps, elle permet de réaliser une importante économie de combustible par rapport au four rotatif. Faut-il en conclure que ce dernier système de four doive être éliminé de toutes les usines où il fonctionne ? Non évidemment. Dans nombre de cas, le maintien de ce four peut être dicté non seulement par la haute résistance du ciment qu'il fournit, mais encore par la pénurie de fines de coke sans lequel il a été impossible jusqu'ici de se servir de la grille tournante à vidange automatique avec certains fours allemands. Il en est tout autrement pour le four Bühler, dont plus de vingt exemplaires fonctionnent avec tous les genres de combustibles.

Il existe actuellement en Allemagne 240 fours rotatifs, 28 fours circulaires et 627 fours droits de différents systèmes, et sur ce nombre 48 fonctionnent avec enfournement et vidange automatiques.

LES FOURS CIRCULAIRES

Le four circulaire inventé par Fr. Hoffmann, est employé depuis plus de 50 ans dans les briqueteries et depuis 40 ans dans les fabriques de ciment. Les anciens fours étaient à marche intermittente, c'est-à-dire que les opérations de chargement, de cuisson, de refroidissement et de vidange y étaient successives, tandis que dans le four Hoffman elles s'effectuent simultanément; aussi, son rendement dépasse de beaucoup celui de tous les anciens systèmes de fours.

Ce four est aussi très économique, car il utilise intégralement le calorique du combustible. Ainsi, la chaleur dégagée par les clinkers pendant leur refroidissement sert à réchauffer l'air qui pénètre dans le four ; d'un autre côté, les gaz de la combustion qui, dans les anciens fours, se perdaient dans l'atmosphère avec la fumée, servent dans le four circulaire à réchauffer la matière avant qu'elle ne soit soumise à la cuisson. La dépense de combustible y est de 18 à 20 % du poids des clinkers, suivant la qualité du charbon et la facilité de cuisson de la matière. Les fours circulaires de petites dimensions produisent 80 à 100 barils de ciment

par jour ; ceux de grandes dimensions en produisent 400 à 500, soit 68.000 à 85.000 kg.

Four Hoffmann. — Le four circulaire de Hoffmann se compose d'une galerie circulaire, divisée en sections ou compartiments (au nombre de 16 à 20) au moyen de cloisons mobiles en tôle ou en fort papier ; chaque compartiment constitue une chambre à cuisson et communique avec le dehors par une porte et avec la cheminée par un conduit débouchant dans un carneau central. Pour donner plus de force au tirage, on installe souvent pour chaque compartiment deux conduits, dont l'un se trouve à l'intérieur, l'autre à l'extérieur. La cheminée peut être construite au milieu ou à l'extérieur du four ; dans ce dernier cas, le carneau central qui communique avec elle est à grand diamètre.

Les portes des compartiments servent à l'introduction des briquettes et à la vidange du ciment cuit. Quand un compartiment est rempli de briques, on le ferme par une cloison mobile (ci-dessus mentionnée) ; on ferme également la porte, on enlève la cloison du compartiment précédent et on met le nouveau compartiment en communication avec la cheminée. Pendant la cuisson, toutes les portes des compartiments sont hermétiquement closes, à l'exception de celle des compartiments qui sont en chargement ou en vidange.

Les figures 88 à 90 montrent le four vu en plan, en coupe transversale et partie en coupe longitudinale avec cheminée à l'extérieur. Dans la figure 90 on voit que le carneau central est voûté et que les conduits qui y débouchent sont munis de régulateurs en forme de cloche qu'on actionne du dehors.

La combustion dans les compartiments fait incessamment le tour du four en suivant la direction du tirage ; celui-ci va toujours à la rencontre de briquettes fraîches et laisse derrière lui le ciment cuit, qu'on évacue après refroidissement. Le courant d'air produit dans la galerie par la cheminée suit une direction horizontale et va généralement dans le sens de l'aiguille d'une montre.

De la rapidité que met le feu à s'avancer dans la galerie et du diamètre de cette dernière dépend la quantité de ciment cuit par jour : plus la marche du feu est rapide, moins on brûle de combustible.

L'introduction du combustible dans les compartiments se fait

par des orifices pratiqués dans la voûte. A cet effet, quand on empile dans un compartiment les briquettes à cuire, on ménage dans le centre de la pile un vide suffisant pour y verser le combustible.

Comme les briquettes, traversées par les gaz chauds venant des autres compartiments, se trouvent déjà à l'état incandescent quand on y ajoute le combustible, celui-ci s'enflamme spontanément.

Lorsque les briquettes sont fabriquées avec de la pâte humide,

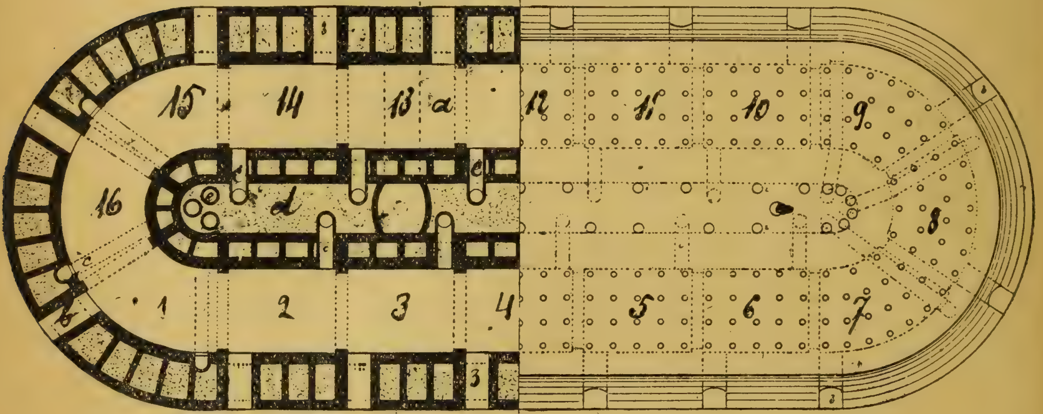


Fig. 88. — Four Hoffmann. Plan.

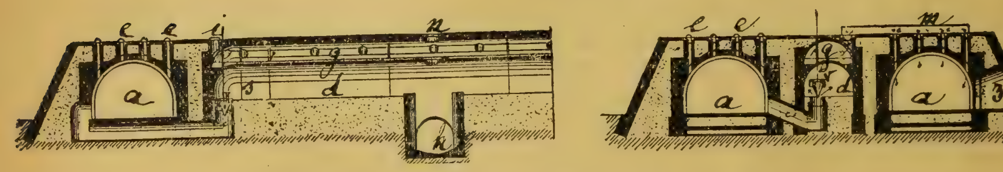


Fig. 89 et 90. — Four Hoffmann. Plans et coupes

elles doivent être séchées avant d'être placées dans le four, tandis que si elles proviennent de pâte sèche à 8-10 % d'eau, il suffit de les abandonner à elles-mêmes pendant 24 heures avant de les faire cuire. Dans certaines usines elles vont directement de la presse dans le four.

L'introduction des briquettes et la vidange des clinkers s'effectuent aisément et ne présentent aucun danger pour la santé des ouvriers. La mise en route du four n'est pas toujours exempte de difficultés et demande des ouvriers exercés ; mais lorsqu'il est en marche normale et que les ouvriers sont bien familiarisés avec le

travail, il donne de bons rendements et se prête à une production massive.

LE FOUR ROTATIF

De tous les systèmes de fours, c'est le four rotatif qui répond le mieux aux exigences de l'industrie moderne, parce qu'il permet d'imprimer à la fabrication une grande rapidité et de réduire la main-d'œuvre au minimum possible. Ce four s'impose donc à l'attention des fabricants, et les perfectionnements dont il est l'objet présentent un intérêt capital pour toute l'industrie du ciment.

Dans les fours continus que nous avons décrits la durée de la cuisson varie de 8 à 20 heures : il convient d'y ajouter le temps nécessaire à la confection et au séchage artificiel des briquettes et, quand il s'agit du four circulaire, du temps requis pour les empiler dans les chambres et pour refroidir le ciment cuit, toutes opérations qui absorbent un temps et une main-d'œuvre considérables. Dans le four rotatif la cuisson est beaucoup plus rapide ; son fonctionnement est absolument indépendant des conditions atmosphériques et du plus ou moins d'habileté des ouvriers dont un seul suffit pour le conduire et le surveiller. Est-ce à dire que ce four doive être seul employé partout et toujours quelles que soient les conditions où l'on se trouve et quelle que soit la qualité des matières premières mises en œuvre ?

Il faut laisser au temps et à l'expérience le soin de résoudre cette question. Quoi qu'il en soit, le four rotatif a opéré une véritable révolution dans la fabrication du ciment.

Cependant, il serait prématuré, croyons-nous, d'affirmer que ce système est plus économique que les autres. L'installation d'une usine avec fours rotatifs revient plus cher et exige plus de force motrice qu'avec les anciens fours : si elle supprime le travail de confection des briquettes et leur séchage, elle entraîne en revanche la nécessité de broyer et de sécher le charbon, de sorte que, au point de vue de l'outillage, elle n'apporte aucune simplification. Il n'en est pas moins vrai que le four rotatif s'est répandu considérablement dans l'espace de quelques années. Son principal avantage consiste non dans une diminution des frais d'installation, mais essentiellement dans la diminution de la main-d'œuvre et dans le relèvement de la qualité du ciment. L'énor-

me développement pris par l'industrie du ciment aux Etats-Unis d'Amérique où le charbon est à bon marché et la main-d'œuvre à un prix très élevé, est dû, en dehors des conditions de vitalité, à la première de ces deux causes.

Un autre facteur absolument hors de conteste est le relèvement de la qualité du ciment qui paraît devoir être attribué au système. Dans un rapport présenté à l'assemblée des fabricants de ciment allemands en 1907 le Dr Framm déclare que, en 1906, la résistance des ciments à la traction s'est élevée de 21 kg. 61 en 1905 à 25 kg. 52, que la résistance moyenne à la pression a passé de 243 kg. 30 à 250 kg. 80, et qu'en même temps le nombre des ciments qui ont résisté à l'épreuve de la prise rapide s'est accru considérablement. Cette amélioration de la qualité des produits est due sans aucun doute à l'adoption du four rotatif par les fabricants de ciment.

Fred. Randsome fut le premier qui songea à employer un four rotatif pour la cuisson du ciment; son brevet anglais date du 2 mai 1885. Ce four se composait d'un tambour cylindrique revêtu intérieurement de briques réfractaires, tournant sur galets en deux points différents, actionné par courroie au moyen d'une hélice. Le tambour avait une position légèrement inclinée. La matière à cuire sous forme de poudre sèche, contenue dans un réservoir, était amenée dans le tambour en un jet uniforme à l'aide d'un système quelconque d'alimentation. Le four était chauffé au gaz. Le clinker était évacué à l'extrémité inférieure du tambour.

Le four Randsome eut quelques applications en Angleterre, mais il avait l'inconvénient de dépenser beaucoup de combustible; en outre, les frais d'entretien du revêtement intérieur étaient très élevés et le ciment produit manquait d'uniformité.

Ce premier échec ne fut pas pour décourager les ingénieurs. Le brevet Randsome fut acheté par M. I. F. de Navarre de New-York qui, après de nombreux essais et tâtonnements, réussit à faire fonctionner le four rotatif dans des conditions à peu près normales. Cependant, jusqu'en 1892, il n'y eut aux Etats-Unis que deux fours en marche; ils fournissaient un ciment de bonne qualité, mais à un prix trop élevé. Le combustible employé était le pétrole dont on brûlait 38 à 57 litres par baril de ciment (170 kg.).

M. de Navarre s'efforça dès lors d'utiliser les chaleurs perdues afin de rendre le four rotatif plus économique.

Il effectuait la cuisson à l'aide de pétrole pulvérisé par un jet d'air comprimé; le four tournait sur galets et le mouvement de rotation lui était imprimé par une couronne dentée, un pignon et un train d'engrenages; la vitesse de rotation était d'environ 1 tour par minute. La matière, légèrement humectée, était introduite dans le four à l'aide d'une vis; en sortant du four, le ciment tombait dans un second tambour dans lequel il se refroidissait et dans lequel passait l'air nécessaire à la combustion et se rechauffait au contact des clinkers encore à l'état incandescent.

En 1895, Harry et Seamann firent breveter des modifications au four rotatif, mais ces modifications n'ont porté que sur des détails.

Ce four a eu de nombreuses applications en Amérique. Sa caractéristique est de faciliter le refroidissement intense et rapide du clinker et l'utilisation partielle de son calorique. Quant à la récupération du calorique, elle s'effectuait déjà aussi bien dans le four de Navarre; les gaz de la combustion n'y sont l'objet d'aucune autre utilisation.

Les constructeurs américains sont également réfractaires à l'idée d'utiliser les gaz pour la dessiccation des matières premières, bien que de nombreux essais aient été faits dans cette voie. Lewis déclare à ce sujet qu'en 1898-99 il a essayé de recueillir et d'utiliser les gaz de la combustion pour sécher la pierre à chaux, mais qu'il n'y a trouvé aucun avantage. Dans la suite, en 1904, la Lehigh Portland Cement Company fit une nouvelle installation avec ce dispositif. Les gaz de quatre fours sur dix furent dirigés de la chambre à poussière dans des tambours contenant la pierre à chaux. Cette installation eut pour effet de compliquer la préparation des matières premières et d'augmenter la dépense de combustible des fours. Le bénéfice a été tellement insignifiant qu'on a jugé inutile de continuer l'expérience.

Les expériences faites sur ce point en Allemagne ne concordent pas avec celles du spécialiste américain. L'adjonction au four d'un tambour-séchoir ne complique pas l'installation, et elle n'entraîne pas une augmentation de la dépense de combustible du four. Nous estimons, par conséquent, que le fait de ne pas utiliser les gaz de la combustion, dont la température est de 800° degrés

et plus, au séchage des matières premières, est un gaspillage que rien ne justifie, surtout quand on emploie des fours qui n'ont que 18 m. de long, ce qui est encore fréquent en Amérique. Même avec des fours de 37 m. de long, on peut encore très bien utiliser de la manière indiquée les gaz, dont la température n'est pas inférieure à 500-550°. Mais si l'on donne aux fours des dimensions encore plus grandes, comme le fait Edison avec son four de 45 m., la température des gaz de la combustion à leur sortie des appareils est tellement basse qu'elle suffit à peine pour assurer le tirage de la cheminée; dans ce cas, il est nécessaire de faire sécher les matières premières à l'aide d'un foyer spécial. Le meilleur point d'utilisation de la chaleur est alors le four lui-même.

Par conséquent, pour donner au four rotatif tout le perfectionnement désirable au point de vue économique, on devra s'efforcer non seulement d'augmenter sa longueur et sa surface de chauffe, d'y établir un contact plus intime entre la matière à cuire et les gaz de la combustion, comme Lewis le préconise avec raison, — mais il faut encore utiliser dans la limite du possible les chaleurs perdues par le clinker incandescent à sa sortie du four. Le meilleur mode d'utilisation de ce calorique est de l'employer pour le chauffage de l'air destiné à la combustion dans le four et au chauffage des locaux en hiver. Le séchage des matières premières et du charbon se fait le mieux à l'aide de foyers spéciaux.

Le four rotatif n'a été introduit en Allemagne que longtemps après son adoption en Amérique; on l'utilisa tout d'abord (1899) pour la fabrication de ciment de pouzzolane en mélangeant et faisant cuire dans un tambour rotatif des scories granulées et de la poudre de chaux. Comme il fallait s'y attendre, la fabrication présentait de grandes difficultés, car on manquait d'expérience sur les points les plus importants du travail, tels que le mode de chauffage, le revêtement du four, les dispositifs de chargement de la poudre brute, etc. Mais, il n'a pas fallu plus d'un an pour surmonter ces difficultés et donner à la fabrication une allure régulière. Actuellement on compte 700 fours rotatifs en Europe, environ 850 en Amérique et dans les autres parties du monde, soit en tout 1.500.

Nous allons décrire brièvement, à l'aide des figures 91 et 92, le mode de fonctionnement du four rotatif de construction actuelle. La poudre brute, préparée par voie sèche et humectée d'un

peu d'eau (5 à 8 %) à l'aide d'une vis malaxeuse (ou la boue préparée par voie humide et contenant environ 35 à 40 % d'eau) est introduite par un tuyau d'amenée dans le cylindre horizontal A légèrement incliné et tournant sur lui-même, dans lequel elle s'avance lentement à la rencontre de la combustion qui se trouve à l'extrémité opposée. Dans ce trajet elle s'échauffe peu à peu. La première zone est celle de l'évaporation de l'eau, la seconde celle de l'élimination de l'acide carbonique, et la troisième celle de la cuisson. Le clinker cuit, encore à l'état incandescent, tombe par

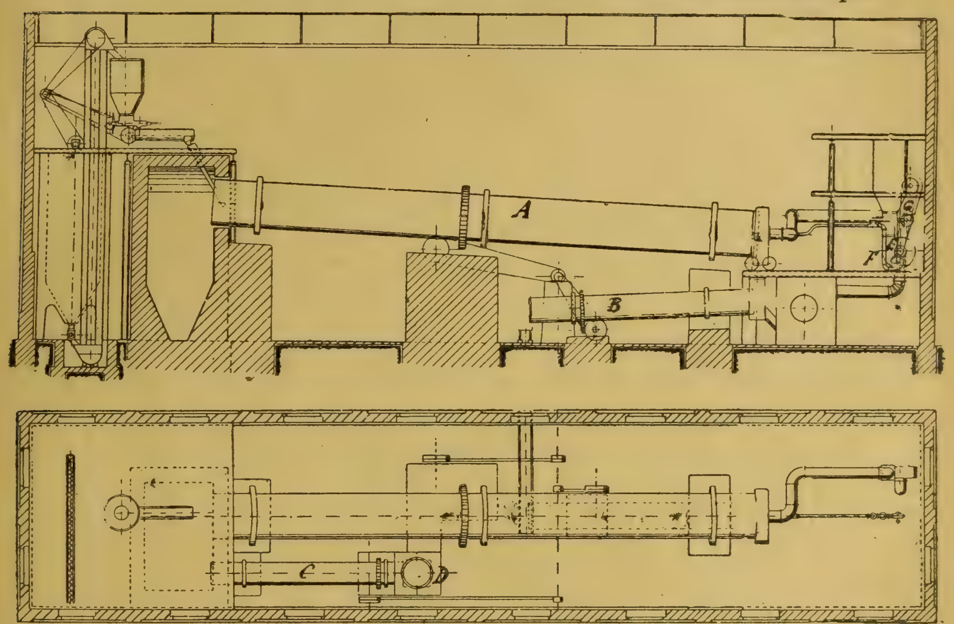


Fig. 91 et 92. — Vue schématique du four rotatif. Elévation et plan

un plan incliné dans le cylindre rotatif B où il est refroidi par un courant d'air aspiré par le ventilateur E, et quand il arrive à l'extrémité inférieure, il se trouve à une température convenable pour être amené au moulin broyeur au moyen de wagonnets basculants ou d'un système de transport mécanique.

Les gaz de la combustion du four passent de la chambre à fumée et à poussière, dans laquelle le four débouche à son extrémité supérieure, dans un troisième cylindre où ils sèchent la matière brute finement moulue qui y est contenue, et de là ils sont évacués au dehors par la cheminée D. (Dans la mise en œuvre de

matières préparées par le procédé humide, le cylindre séchoir est naturellement supprimé).

Comme combustible on emploie du charbon très finement broyé qui est injecté dans le tambour cuiseur à l'aide du ventilateur F en même temps que les gaz de la combustion absorbés par l'exhausteur E et l'air qui a été réchauffé par son passage sur le clinker incandescent.

Après ce rapide aperçu sur la marche du four, nous allons donner quelques détails sur chacune des phases d'une opération.

a) *Chargement du four.* — Une condition essentielle à la bonne marche du four est de l'alimenter d'une manière uniforme et de régler l'introduction de la matière d'une façon rapide et sûre.

Quand on travaille par le procédé sec on installe en tête du four un réservoir pouvant contenir environ 10 m³ de matière en poudre, de manière à s'affranchir des petites irrégularités qui peuvent survenir dans l'alimentation de ce réservoir et de laisser à l'ouvrier chargé de ce poste une certaine liberté de mouvement. La poudre brute est amenée au réservoir à l'aide d'une vis dont la vitesse de rotation peut être réglée à l'aide de poulies à friction ou d'autres moyens de ce genre.

Pour empêcher la vis d'amenée de la matière dans le four de s'obstruer, la maison G. Polysius se sert d'une vis double qui présente l'avantage de ne pas former dans le réservoir des creux, dont on connaît les désagréments. Le changement de vitesse est obtenu par l'emploi d'un régulateur composé de deux poulies extensibles à disques entraînées par une courroie qui sont reliées par des tirants, de telle sorte que si l'on tourne un volant une des deux paires de disques se resserre tandis que l'autre s'écarte. Entre la position moyenne et les positions extrêmes des deux paires il y a un grand nombre de positions intermédiaires, et par suite autant de vitesses différentes.

Ce dispositif, inventé par les Américains, donne de bons résultats; mais il convient d'employer des disques assez grands qui donnent plus de sécurité.

Dans le procédé de préparation des matières par voie humide, on installe également un réservoir en tête du four, et on fait en sorte que la boue y soit amenée d'une manière uniforme. Pour plus de sécurité, on installe un petit réservoir intermédiaire des-

tiné à alimenter le four. La position du clapet d'écoulement est réglée ici le mieux à l'aide d'une chaîne.

b) *Le cylindre cuiseur.* — Le cylindre cuiseur pénètre, par son extrémité supérieure, dans la chambre à fumée et à poussière; le

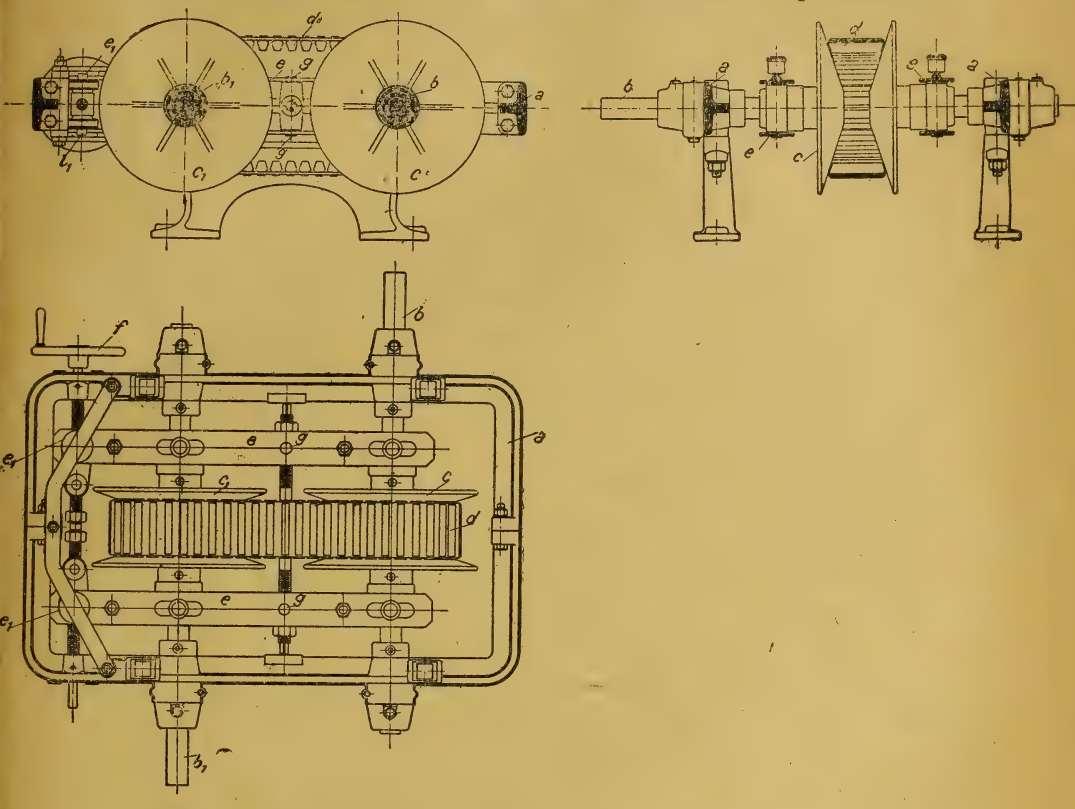


FIG. 93, 94 et 95. — Régulateur à poulies extensibles

petit espace nécessaire au jeu du cylindre est rendu étanche au moyen de segments amovibles en tôle, de sorte qu'il ne peut en sortir ni fumée ni poussière. L'extrémité inférieure du cylindre débouche soit dans une tête en maçonnerie, soit dans une tête amovible. Ce dernier système présente l'avantage de faciliter l'accès de l'intérieur du four lorsqu'il s'agit de réparations à faire à la garniture réfractaire. La porte de fermeture de la tête du four est munie de regards en mica, d'une porte et d'une tuyère pour le feu.

La garniture intérieure du four est en briques réfractaires ou

en béton de ciment. D'après Meade, les briques réfractaires doivent avoir la composition suivante :

SiO^2	45 à 50 %
Al^2O^3	43 à 48 »
Fe^2O^3 moins de	3 »
MgO »	0,5 »
CaO »	0,5 »

La durée normale d'une chemise de ce genre est de 9 à 12 mois; après cette période il est nécessaire de la renouveler sur une longueur de 8 à 10 mètres calculée à partir de l'extrémité inférieure du four, tandis que dans la zone supérieure, derrière la zone de cuisson, elle a une durée en quelque sorte illimitée. Dans les fours servant à la cuisson des matières préparées par le procédé humide, il est d'usage de ne pas mettre de chemise sur les 7-8 derniers mètres, cette partie étant maintenue fraîche par la boue; on se contente de munir cette partie du cylindre de fers en *U* ou en *Z* destinés à faciliter la descente de la matière et à hâter sa dessiccation. Enfin, on place parfois entre la chemise et le manteau du four une garniture en amiante destinée à diminuer la perte de calorique par rayonnement.

Lorsque la garniture est en béton de ciment, on la prépare en gâchant ensemble avec de l'eau, du ciment et du clinker broyé et passé au tamis à mailles de 6 mm. de section; la proportion des deux composants est de 12 : 30. La garniture en béton de ciment étant faite de matières ayant la même composition que les matières à cuire, ne donne pas lieu aux mêmes réactions que celles qui s'établissent entre les briques réfractaires acides et le clinker basique; elle présente en outre, cet avantage qu'on a toujours sous la main les matières nécessaires pour la remplacer ou la réparer.

Le cylindre cuiseur a un diamètre de 2 à 3 m. et une longueur de 50 m.; il y a peu de temps encore, il était de règle de lui donner une longueur plus faible pour la cuisson des matières préparées par le procédé sec que pour celle des matières préparées par le procédé humide. Aux Etats-Unis on rencontre souvent encore des fours de 18 m. de long pour la cuisson des matières préparées d'après l'une et l'autre méthode; à ceux de nouvelle construction cependant, on donne des longueurs allant de 45 à 50 m. et plus, car on a reconnu que, au point de vue économique, on avait tout avantage à augmenter la longueur du four. En Allemagne les

fours de 20 m. de long ont été abandonnés depuis longtemps et actuellement on n'en construit pas qui aient moins de 35 m., non seulement pour la cuisson des matières préparées par le procédé humide, mais encore pour celles préparées par voie sèche.

Le cylindre cuiseur est fait de forte tôle en feuilles de dimensions usuelles, jointes par des rivets, et revêtu d'une chemise en matière réfractaire. Il est muni de trois anneaux de roulement en fonte d'acier qui sont fixés de manière à ne pas s'opposer à la dilatation longitudinale et axiale. Ces anneaux de roulement tournent chacun sur une paire de galets en fonte d'acier qui sont montés à joint libre sur un fort pivot. Le galet de butée, contre lequel s'appuie le bord extérieur du chemin de roulement, est disposé verticalement; ce galet maintient le four et l'empêche de glisser sur les galets de roulement par suite de son inclinaison.

Le mouvement de rotation est donné au cylindre par un train d'engrenages. Les essais faits dans le but d'employer à cet effet la roue-hélice ont échoué. L'inclinaison du cylindre varie de 4 à 6 %. Le nombre de tours va de 0,25 à 0,66 par minute.

Le four rotatif à zone de cuisson élargie répond à un double but : celle-ci permet à la flamme de se répandre davantage sur le point spécial où s'effectue la scorification et où la température est à son maximum d'intensité, et par suite d'augmenter le rendement du four. On a prétendu que la zone de cuisson élargie avait été connue en Amérique avant d'être brevetée en Europe; mais c'est là une erreur qui provient de ce que dans une usine d'Amérique on avait transformé les fours rotatifs en les allongeant avec des parties neuves d'un diamètre un peu plus grand.

Partant de ce fait que les gaz de la zone de scorification du four rotatif exigent un espace plus grand que les gaz plus froids de la zone de calcination, les constructeurs avaient été amenés, il y a longtemps déjà, à élargir le diamètre du four sur une longueur de 9 à 10 m. à partir de l'extrémité de sortie, cette modification cependant n'a été adoptée que dans ces derniers temps. On obtient de bons résultats en donnant au four rotatif la forme d'une bouteille, élargissant la zone de scorification et rétrécissant de nouveau le diamètre du four dans la zone de calcination.

Il y a lieu de mentionner également d'une manière toute spéciale les grands fours rotatifs de Pfeiffer frères. Grâce à un dispositif spécial de chauffage, à la grande finesse de mouture du char-

bon à l'aide du broyeur-sélecteur, ces constructeurs sont arrivés à réduire la consommation de charbon au minimum. D'après les expériences faites en dernier lieu, cette consommation ne serait que de 18 %, chiffre qui n'avait encore jamais été atteint.

Le four rotatif à zone de scorification élargie de Polysius a une longueur de 35 m., un diamètre de 2 m. dans la zone de scorification et vers l'extrémité conique de sortie, et un diamètre de 2 m. 40 dans la zone où s'effectue le développement de la flamme et sur une longueur de 7 m. Cette forme a pour effet d'accumuler le combustible dans la zone élargie du four, d'où doit résulter une combustion parfaite sans qu'il soit nécessaire de maintenir anxieusement la flamme à sa température la plus élevée.

Un autre avantage consiste dans la diminution du danger d'incuisson par ralentissement de la scorification; enfin, l'élargisse-

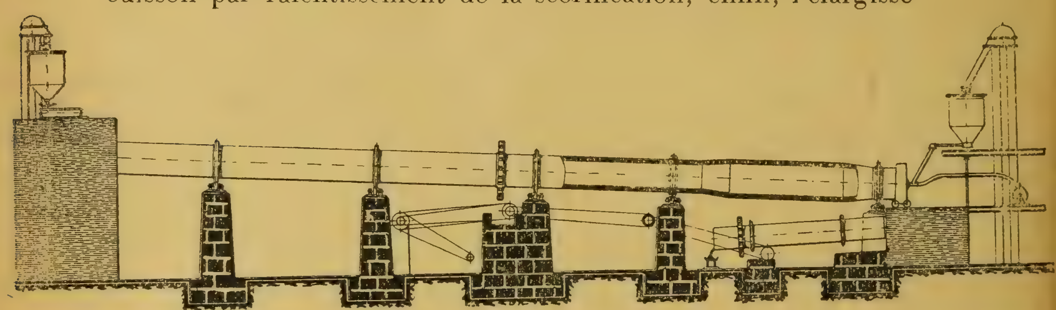


Fig. 96. — Four rotatif à zône élargie

ment de la zone de scorification s'oppose à la formation de dépôts et d'incrustations sur la paroi du four, ce qui diminue les causes d'arrêt dans le fonctionnement et augmente la puissance de traval du four.

L'air nécessaire à la combustion dans le four est injecté par un ventilateur dans le tambour refroidisseur, il se réchauffe au contact des clinkers incandescents et à sa sortie il est injecté dans le four rotatif en même temps que le poussier de charbon.

Le tirage de la cheminée joue un grand rôle dans la qualité des ciments et le rendement des fours. Aussi, pour obvier aux influences atmosphériques, qui tantôt activent le tirage, tantôt le diminuent, on a appliqué aux anciens fours un système d''injection d'air par le bas et on en a obtenu de bons résultats. En ce qui concerne le four Hoffmann on est même allé plus loin, en suppri-

mant la cheminée pour la remplacer par un ventilateur, tandis que pour le four rotatif Matcham préconise une méthode diamétralement opposée consistant à supprimer le tirage artificiel de la cheminée, qui jusqu'ici était de règle dans les fabriques de ciment. Pour justifier sa méthode, Matcham affirme que le tirage naturel produit dans le four rotatif une zone de calcination plus grande et d'une température plus uniforme que le tirage forcé, et que le ciment peut être cuit dès lors à une température moins élevée. Par suite, le revêtement intérieur du four aurait une durée plus longue que dans le procédé actuel où la flamme est habituellement concentrée sur un point déterminé de la zone de calcination. Un autre avantage inhérent au nouveau système consisterait dans une diminution des frais d'installation et de fabrication par la suppression des ventilateurs, la parfaite combustion du poussier de charbon, la suppression de tout dégagement de poussière et l'amélioration de la qualité du produit due à une plus grande uniformité de la cuisson, le tout sans préjudice du rendement de l'usine.

Pour réaliser sûrement tous ces avantages, il suffirait, d'après Matcham, de faire communiquer chaque four rotatif avec une cheminée de 60 m. de haut et d'un diamètre moyen de 2 m.

Les figures 97 et 98 permettent de se faire une idée de la méthode de cuisson de Matcham. Appliquée dans différentes usines d'Amérique, et notamment dans la nouvelle fabrique de ciment Portland de Seabord qui sera décrite plus loin, cette méthode aurait donné de bons résultats. Dans les figures 97 et 98, *a* est la vis d'amenée du poussier de charbon, *b* la trémie de chargement, *c* la tête mobile du four, *d* l'extrémité de sortie du four; *e* est l'ouverture de sortie du clinker par laquelle rentre en même temps l'air nécessaire à la combustion, après s'être réchauffé par son passage à travers le tambour refroidisseur qui est placé en-dessous. Le plan incliné *f* sur lequel glisse le poussier de charbon pour se mélanger avec l'air de la combustion venant de *c*, est refroidi avec de l'eau.

Si l'on jette un coup d'œil sur l'état actuel du four rotatif, on constate qu'il est l'objet de perfectionnements incessants. Les fours Edison, construits il y a quelques années et mesurant 45 m. 600 × 2 m736 étaient à l'époque considérés comme des géants. Or, ils sont largement dépassés actuellement par les fours

à ciment installés à l'usine Dyckerhoff à Amôneburg près Biebrich sur le Rhin ; ces fours mesurent, en effet, 50 m. de long et 3 m. de diamètre. Il est de fait qu'avec la longueur et le diamètre du four augmentent considérablement l'économie de combustible et le rendement de l'installation. Ainsi, par exemple, tandis qu'un four mesurant 25 × 1,80 m. produit en 24 heures 50 tonnes de clinker avec une dépense de 26 % de combustible ; lorsque la matière y est chargée à l'état pulvérulent, le four Edisoı ne dépense que 22,6 % de combustible avec un rendement de 125

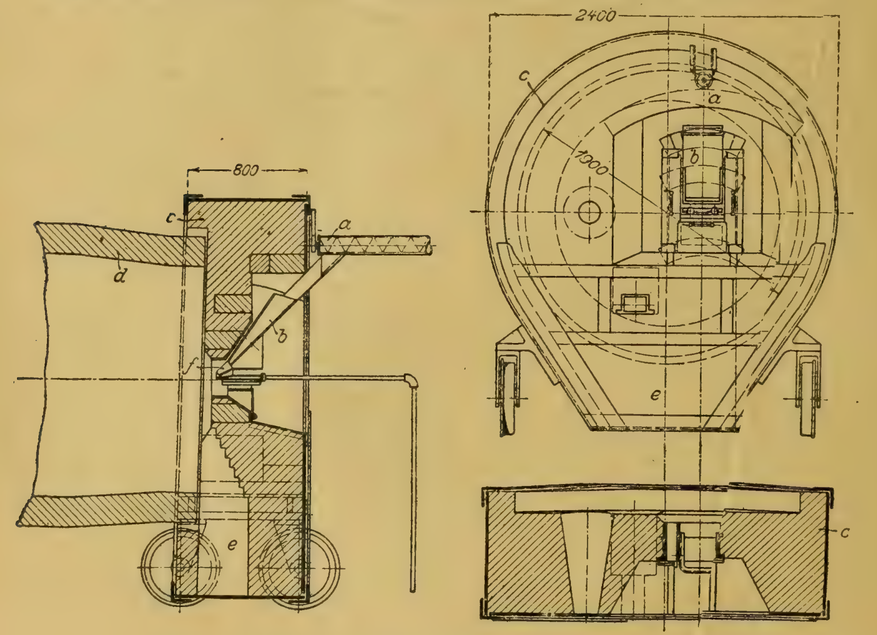


Fig. 97 et 98. — Système de chauffage de Matchan

tonnes. Admettons même, si l'on veut, que la dimiution de la dépense de combustible puisse être attribuée en paie aux soins qu'on apporte actuellement au broyage du charbor il n'en reste pas moins prouvé que les fours rotatifs de grand dimensions sont plus économiques que les fours plus petits il paraît donc hors de doute que l'avenir appartient aux fours de grandes dimensions.

c) *Le refroidisseur de clinker.* — Le clinker cit à point quitte le cylindre à l'état incandescent ; il est donc nécéaire de le refroidir énergiquement avant de le mettre en réser ou de l'envoyer

au broyeur. A cet effet, on se sert d'un cylindre dont la construction est analogue à celle du cylindre cuiseur : il a un diamètre de 1 m. à 1 m. 60 et une longueur de 15 à 20 m.; il est muni de deux chemins de roulement et mis en mouvement à l'aide d'une poulie et d'un jeu d'engrenages. L'extrémité à laquelle se fait l'entrée de la matière est revêtue intérieurement de briques réfractaires ou bien elle se termine par un boîte en fonte résistant aux très hautes températures. Le cylindre est muni intérieurement de fers en U, pour élever et retourner le clinker chaud.

Le refroidisseur construit par la maison F. L. Smidth et Cie, à Copenhague, diffère de ceux de construction ordinaire en ce sens qu'il est horizontal et à retour de courant, c'est-à-dire à deux parois concentriques. Après avoir parcouru le tube intérieur, les clinkers tombent dans le tube extérieur où se termine le refroidissement.

A l'extrémité de sortie le refroidisseur est enfermé dans une enveloppe dans laquelle un ventilateur envoie de l'air froid sous pression. L'air, circulant en sens inverse des clinkers, leur enlève tout leur calorique et, comme le refroidisseur est à double paroi, la perte de chaleur par rayonnement est très faible.

Ce système breveté présente plusieurs avantages : le ventilateur refoulant de l'air frais au lieu d'aspirer de l'air chaud, donne un rendement utile supérieur, et les clinkers sont promptement refroidis à la température ambiante.

L'air est porté à une température relativement élevée, soit à environ 500 degrés, et comme il est principalement utilisé pour la combustion, celle-ci s'opère d'une manière plus régulière et plus économique. Des dispositions spéciales permettent de faire rentrer cet air chaud directement dans le four, sans passer par des conduites extérieures. Une partie de l'air chauffé est aussi utilisée pour le séchage du charbon.

Grâce à l'ensemble de cette disposition, le four chargé de pâte épaisse peut cuire 70 à 200 tonnes de ciment par jour, avec une consommation relativement faible de charbon.

La différence capitale qui existe entre le refroidisseur de Smidth et ceux des autres systèmes consiste donc pour ces dernirs dans l'obligation de faire aspirer par le ventilateur et d'injecter dans les tambours cuiseurs l'air chauffé par les chaleurs perdues du clinker, d'où la nécessité de manipuler de grands volumes d'air

chaud qui détériore rapidement le ventilateur, tandis qu'avec le refroidisseur Smidth il suffit de faire aspirer de l'air frais dans le refroidisseur à l'aide du ventilateur.

Les clinkers sortant du refroidisseur tombent sur un transporteur qui les conduit hors du bâtiment, puis dans certaines installations, les déverse dans une chaîne à godets qui les décharge dans un silo système Hallgren, d'une contenance de 1.000 m³. Le silotage est activé par une injection d'air sous pression; lorsqu'il est terminé, les clinkers tirés au bas du silo tombent sur un transporteur qui les déverse sur une courroie pour les amener aux broyeurs.

Au lieu d'un tambour refroidisseur, Pfeiffer frères en emploient quatre à six qui font corps avec le four rotatif et communiquent avec son intérieur au moyen de tronçon *b* (fig. 99). Les clinkers

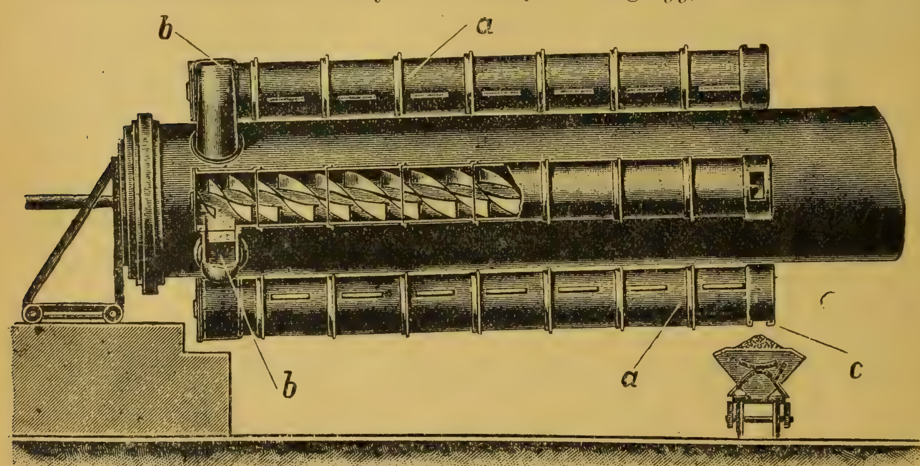


Fig. 99. — Four Pfeiffer à refroidisseur multitubulaire.

se déversent dans les refroidisseurs par ce tronçon et y sont charriés vers l'extrémité opposée par des fers disposés hélicoïdalement; il les quittent en *c*. L'air servant au refroidissement des clinkers est ensuite utilisé pour la combustion dans le four rotatif. L'emploi d'un certain nombre de refroidisseurs à petit diamètre permet de mettre une plus grande quantité d'air en contact avec les clinkers incandescents et, par suite, de rechauffer cet air plus fortement. Un autre avantage de ce mode de construction consiste dans la suppression des fondations exigées par les

refroidisseurs de la forme usuelle, dans l'économie de la force motrice nécessaire pour les actionner et enfin dans la diminution d'environ 6 m. de la hauteur d'installation du four rotatif.

Aux Etats-Unis d'Amérique, au lieu de cylindres refroidisseurs, on emploie de préférence des tours. Le clinker cuit est élevé au moyen d'une chaîne à godets dans une trémie qui le déverse dans une caisse munie d'un croisillon. Celui-ci, sous le poids du clinker, exécute un mouvement de basculement et déverse la matière dans la tour où elle rencontre un courant d'air injecté par le bas.

L'air chauffé par son passage à travers le clinker est aspiré au haut de la tour et refoulé dans le cylindre cuiseur. On installe un refroidisseur pour deux cylindres cuiseurs.

Un autre genre de refroidisseur également très répandu aux Etats-Unis est celui de Mosser et Son. Il est constitué par une tour de 12 à 14 m. de haut et de 2,5 à 3,3 m. de diamètre. Comme le clinker chaud est arrosé d'eau sur son chemin entre le four cuiseur et la chaîne à godets qui l'élève dans la tour, la quantité de chaleur récupérable n'est pas bien grande. Mais, l'arrosage est indispensable pour protéger la chaîne à godets contre l'action destructive du clinker incandescent; celui-ci en devient d'ailleurs friable et facile à broyer. Meade nie que l'arrosage du ciment ait pour effet de combiner la chaux restée libre ou d'augmenter l'invariabilité de volume; il admet tout au plus que cette opération — en dehors de ses effets physiques — peut empêcher la cristallisation de l'aluminate dicalcique soluble du clinker et contribuer ainsi à améliorer la qualité du ciment. Meade a fait plusieurs essais de refroidissement subit de clinker incandescent en le plongeant dans l'eau froide, et le seul effet perceptible qu'il en a obtenu a été de changer sa couleur du vert foncé noirâtre en blanc verdâtre. Desséché et moulu, le clinker ainsi refroidi accuse d'ailleurs identiquement les mêmes propriétés que le clinker qu'on a laissé refroidir lentement. Meade n'a jamais remarqué qu'on ait corrigé un ciment défectueux (unsound) par ce refroidissement subit. La couleur blanc verdâtre du ciment ainsi refroidi correspond peut-être à la couleur normale du ciment chaud, vu qu'en cet état tous les éléments qui le composent se trouvent en solution dans le magma incandescent. Dans le refroidissement lent le fer se manifeste par sa couleur noire sous forme d'oxyde de

fer magnétique Fe^3O^4, tandis que dans le refroidissement subit il n'a pas le temps nécessaire pour prendre cette forme.

d) *Le chauffage.* — Comme on l'a déjà remarqué plus haut, les premiers fours rotatifs installés aux Etats-Unis étaient chauffés au pétrole brut. Mais, ce mode de chauffage était peu économique et on n'a pas tardé à y renoncer ; aussi la plupart des fabriques de ciment ont adopté le chauffage au charbon réduit en poudre. Dans l'Etat du Kansas, certaines usines se servent de gaz tellurique qu'elles peuvent se procurer à bon compte ; dans d'autres usines on a fait des essais de cuisson avec les gaz de générateur, gaz mélangés ; mais, malgré les résultats fort satisfaisants qu'on en a obtenus, on n'a pas encore franchi la période d'expérimentation. En Europe, les fours rotatifs sont chauffés invariablement avec le charbon en poudre ; et c'est de ce mode de chauffage que nous nous occuperons en premier lieu.

Le combustible à employer doit être autant que possible de la houille grasse, à faible teneur en cendres et contenant environ 25 % de matières volatiles. On a toujours intérêt, en effet, à se servir d'un combustible à pouvoir calorifique élevé, ce qui permet d'en diminuer proportionnellement les quantités à sécher et à broyer. La houille grasse se gonfle fortement et brûle facilement. Sa teneur en cendres ne devrait pas dépasser 10 % ; car, quoique une partie des cendres se dépose dans les chambres sous forme de poudre fine ou est entraînée au dehors par la cheminée, il y a toujours une fraction qui, si elle ne passe pas dans le ciment, devient nuisible en ce sens que si le charbon n'est pas broyé finement elle forme des dépôts annulaires sur la paroi du four.

On rencontre également des usines où le four rotatif est chauffé avec du lignite ; malgré les difficultés qu'il oppose au séchage (il est le plus souvent très humide) et au broyage, et malgré sa teneur élevée en cendres, il donne généralement des résultats satisfaisants ; mais, quoiqu'il soit meilleur marché que la houille, celle-ci mérite toujours la préférence en raison même de son pouvoir calorifique plus élevé.

Pour bien se prêter au broyage, le charbon doit être préalablement séché. Nous avons déjà fait observer plus haut qu'on utilise pour ce séchage une partie de l'air chauffé par son passage à travers le clinker incandescent, ou encore les gaz de la combustion du four lui-même. Toutefois, pour conserver au charbon

tout son pouvoir calorifique, son chauffage en vue du séchage doit être maintenu dans une certaine limite, au-delà de laquelle il perdrait ses éléments volatils et serait exposé à s'enflammer. L'installation de séchage se compose généralement d'un tambour rotatif muni intérieurement de palettes de retournement. Lathbury et Spackmann placent dans le tambour un second cylindre dans lequel les gaz chauds pénètrent d'abord pour traverser ensuite l'espace annulaire dans lequel le charbon se meut lentement vers la porte de vidange. Un autre genre de construction consiste à enfermer le tambour dans une enveloppe en maçonnerie et à faire agir les gaz de chauffage également sur l'extérieur du tambour, avant qu'ils ne se dégagent par la cheminée. L'humidité vaporisée et la poussière de charbon sont dirigées sous le foyer et utilisées pour la combustion. Dans les deux genres de construction que nous venons de citer le tambour est muni d'un foyer et le séchage se fait uniquement par les gaz de la combustion, non par l'air chauffé au contact du clinker.

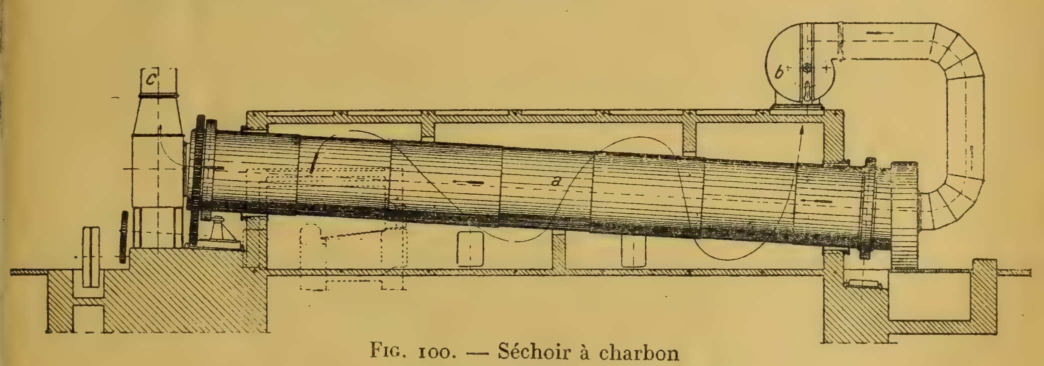


Fig. 100. — Séchoir à charbon

La figure 100 montre l'installation d'un séchoir à charbon. C'est un tambour complètement enfermé dans une maçonnerie, à l'exception de ses galets de roulement qui sont facilement accessibles. Le séchage se fait ici par l'air rechauffé au contact du clinker dans le refroidisseur ; on a d'ailleurs prévu un foyer spécial qui est indiqué en pointillé. Les gaz chauds baignent d'abord l'extérieur du tambour, ensuite ils sont refoulés dans l'intérieur par le ventilateur *b*. Pour retenir les particules de charbon qui peuvent être entraînées, on a installé un cyclone dans la hotte de dégagement *c*. Le tambour-séchoir a une longueur variable, pouvant aller jusqu'à 20 m. suivant l'importance de l'usine.

L'installation représentée par le schéma de la figure 101 est intéressante, parce qu'elle résout un cas particulièrement difficile, à savoir : celui du séchage des fines d'anthracite telles qu'on les obtient dans les laveries de charbon. Ce charbon contient de 11 à 20 % d'eau, qu'il faut vaporiser. Il contient en outre à l'état sec une importante proportion de poussière, qu'on a tout intérêt à séparer de la masse avant de la soumettre au broyage.

Dans la figure 101 *a* est le foyer qui chauffe le tambour, *b* le tambour lui-même, *c* le ventilateur, *g* un cyclone dans lequel se réunit la majeure partie de la poussière qu'on sépare du charbon et qui est conduite par la goulotte *m* dans l'élévateur *o*. Les gaz

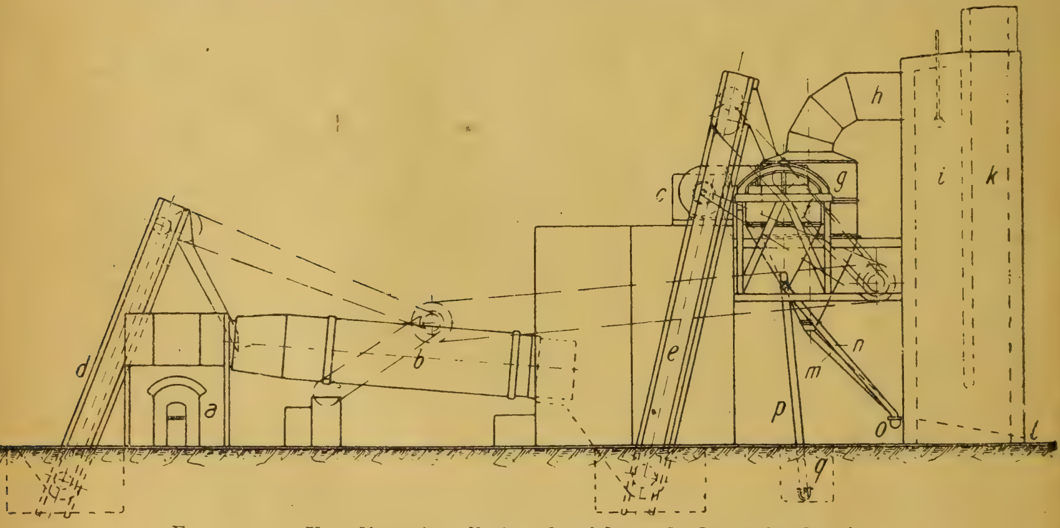


Fig. 101. — Vue d'une installation de séchage de fines d'anthracite

perdus du tambour passent par le tuyau *h* dans le refroidisseur à arrosage *i* et delà dans la cheminée *k*. La poussière de charbon humide est amenée par l'élévateur à godets *d* sur un plan incliné qui la déverse dans le tambour *b*. Le charbon séché est élevé par l'élévateur à godets *e* et passé au séparateur à air *f*, qui sépare la poussière des sablettes : la première se rend par un tuyau *n* dans l'élévateur à godets *o*, tandis que les secondes sont conduites dans la cuvette d'un second élévateur à godets *q*.

Grâce à cette disposition, le broyeur n'a besoin de mettre en œuvre qu'un tiers environ du charbon, dont 2/3 environ se trouvent à l'état de poussière qui en est éliminée au préalable au mo-

yen du séparateur à air et du cyclone et amenée directement au four rotatif. Comme le charbon soumis au broyage doit être très sec et contient beaucoup de poussière, il importe de récupérer celle-ci complètement et de la séparer des gaz à leur sortie du tambour. La boue de charbon obtenue par l'arrosage en *i* est recueillie dans un petit réservoir et brûlée dans le foyer.

Cette installation de séchage présente de l'importance pour l'industrie du ciment, parce que le poussier de charbon des laveries peut être obtenu à très bon compte. Mais on ne peut en tirer un parti avantageux qu'en le soumettant au séchage dans une installation bien comprise.

Lorsque le charbon est bien sec, il s'agit de le broyer aussi finement que possible. Plus ce broyage est fin, mieux on utilise son pouvoir calorifique, car seules les particules les plus fines du charbon sont maintenues en suspension dans le courant d'air produit par le ventilateur et comburées intégralement, tandis que les gros grains se précipitent et échappent à la combustion, contribuant ainsi avec la cendre à former le dépôt annulaire sur la paroi du cylindre. Autrefois on n'attachait aucune importance à ce détail ; on pensait obtenir du charbon assez fin en le broyant à l'aide des broyeurs ordinaires à boulets, quand, à la longue, on s'aperçut que la dépense de combustible était exagérée et que les dépôts de charbon sur la paroi du cylindre entraînaient de graves inconvénients. On reconnut alors la nécessité d'un broyage très fin. Actuellement on exige que la poudre de charbon soit à une finesse telle qu'elle ne laisse que 10 %, au maximum 12 % de résidu sur le tamis de 5.000 mailles au centimètre carré.

Le broyage du charbon peut s'effectuer avec tous les systèmes de broyage qui fournissent une farine fine, exempte de sablettes, tels que les tubes broyeurs combinés avec des broyeurs à boulets, le broyeur-sélecteur Pfeiffer, etc. Les broyeurs à meules et les broyeurs cylindriques ne sont plus employés pour ce broyage, à cause de leur faible rendement.

On construit aussi une machine spéciale pour le broyage du charbon et des matières analogues. Elle est basée sur le même principe que le tube broyeur dont elle ne diffère que par l'accouplement de deux de ces tubes sur le même bâti. Le charbon préalablement desséché est introduit (à la grosseur d'environ un petit pois) dans le premier cylindre, il parcourt ce cylindre de

même que le deuxième cylindre en subissant l'action des corps broyeurs (boulets en acier) et sort de la machine sous forme de poussière fine et uniforme. Cette machine ne comporte aucun système de blutage. Les deux cylindres broyeurs tournent sur pivots creux qui servent en même temps à l'introduction et à la sortie de la matière. Une machine de ce genre, dont les cylindres ont 800 mm. de diamètre et 4.000 mm. de longueur fournit à l'heure environ 1.600 kg. de poudre fine de charbon (résidu 10 % sur tamis de 5.000 mailles) avec une dépense de force motrice de 50 chevaux en chiffres ronds.

Pour le concassage préalable du charbon on se sert de broyeurs à mâchoires de construction légère, ou encore de broyeurs coniques; ces derniers toutefois ne conviennent que pour le broyage de charbon à faible teneur en humidité.

La poussière de charbon est amenée sur le point voulu pour la combustion à l'aide de l'air sous pression. Dans la fig. 91, p. 211, F est un ventilateur dans le tuyau de refoulement duquel débouche le tronçon d'écoulement de l'appareil qui débite la poudre de charbon, E est l'exhausteur qui aspire l'air chaud du refroidisseur de clinker et l'envoie dans le cylindre cuiseur. L'extrémité du tuyau qui refoule la poudre de charbon peut être déplacée dans le sens de la longueur à l'aide d'un levier; ce tuyau est, en outre, muni d'un régulateur de courant.

Dans les fours américains, on emploie le plus souvent le dispositif du système Sturtevant, représenté par la figure 102. A est le réservoir de charbon en poudre, B le distributeur, C le ventilateur, D le tuyau de refoulement et E le four. Dans le tuyau de refoulement est placé un injecteur I dont on connaît la disposition. La figure 103 représente la construction d'un injecteur pour fortes pressions d'air.

Dans les fours Polysius on trouve un dispositif de chauffage analogue à celui de Sturtevant, avec cette différence que Polysius place la tuyère qui opère le mélange immédiatement devant l'entrée du four. Dans les deux cas, le mélange d'air et de charbon s'effectue avant leur arrivée au point où se fait la combustion, méthode qui est plus avantageuse que celle qui consiste à envoyer séparément l'air et le charbon dans le four et à les mélanger seulement au moment où ils arrivent au point où se fait la combustion.

Pour le convoyage du charbon, Polysius emploie les mêmes dispositifs que pour le convoyage de la matière première en poudre, c'est-à-dire son appareil chargeur (double vis) combiné avec un régulateur de vitesse, déjà décrits plus haut.

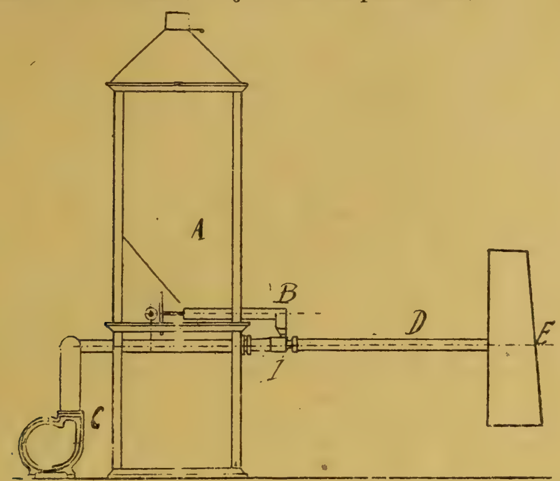


Fig. 102. — Dispositif de chargement du combustible dans le four rotatif

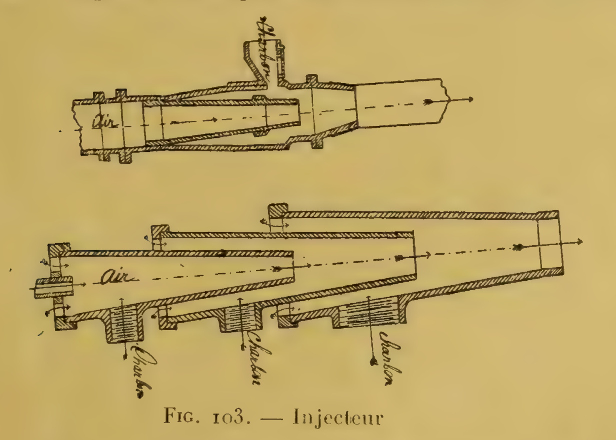


Fig. 103. — Injecteur

Dans ces fours on remarque en outre, que lorsqu'il est nécessaire de changer le nombre de tours de l'appareil de chargement du charbon, le régulateur de vitesse agit en même temps sur le modérateur placé dans le tuyau de refoulement de l'air, de sorte que si l'on vient à modifier le débit de charbon, on modifie du même coup celui de l'air nécessaire à la combustion. Le clapet modérateur s'ouvre davantage lorsque le débit de charbon augmente; il

se referme davantage lorsque ce débit diminue. Le rapport entre les quantités respectives d'air et de charbon varie suivant les conditions locales; on l'établit d'avance en se basant sur l'analyse des gaz de la combustion ; et il n'est plus alors au pouvoir de l'ouvrier desservant le four de le modifier ni dans un sens ni dans l'autre.

e) *Utilisation des chaleurs perdues.* — Les gaz de la combustion sortent du four à une température d'environ 200 à 250° quand on met en œuvre de la matière humide, et à 500-800° quand la matière est à l'état de poudre sèche. Dans le premier cas il est évidemment impossible d'utiliser le calorique des gaz, car il suffit à peine pour entretenir le tirage de la cheminée; mais les efforts qu'on fait pour utiliser la chaleur des gaz dans le second cas sont absolument justifiés.

Le moyen le plus simple d'utiliser partiellement les chaleurs perdues de ces gaz consiste à les employer pour dessécher les matières premières dans des cylindres installés immédiatement contre la chambre à fumée du four (voir *fig.* 91-92, p. 211). La construction de ces sortes de séchoirs est très simple : ils se composent de cylindres en tôle, rivetés, munis intérieurement de palettes pour retourner les matières; ils sont légèrement inclinés et tournent lentement sur des galets, étant actionnés par poulie et engrenages. Ils ont généralement un diamètre de 1 m. 80 et une longueur variable de 14 à 20 m. Lorsque ces cylindres sont destinés à sécher de l'argile très humide ou de la marne calcaire, on les entoure d'une maçonnerie et on les chauffe par les gaz à la fois à l'intérieur et à l'extérieur. On les combine avec un petit foyer auxiliaire dont on se sert pour la mise en route ou après un arrêt prolongé.

Il est intéressant de citer ici l'opinion d'un spécialiste, le Dr Bruhn, sur le meilleur mode d'utilisation des chaleurs perdues.

« Le clinker cuit dans le four rotatif arrive dans le tambour refroidisseur à une température moyenne de 1.000°, et le quitte généralement à une température de 100°, par conséquent le maximum de calorique récupéré théoriquement est de 100 × 0,2 × 900 = 18.000 calories (correspondant à 2,6 kg. de charbon à 7.000 calories). On ne peut donc prétendre récupérer plus de calorique que cette quantité. Pour enlever au clinker le maximum de calorique on envoie dans le cylindre refroidisseur un courant d'air froid, comme on l'a vu plus haut. Mais il faut se borner à

envoyer dans ce dernier la quantité d'air nécessaire à la combustion du charbon dans le four.

« La cuisson de 100 kg. de ciment exige en chiffres ronds 25 kg de charbon de qualité moyenne; 1 kg. de charbon exige pour brûler 10,4 kg. d'air. Par conséquent il faudra envoyer dans le four au minimum 260 kg. d'air par chaque fois 100 kg. de ciment. Les 18.000 calories à récupérer dans le cylindre refroidisseur, en supposant qu'il n'y ait aucune perte par rayonnement, pourront réchauffer les 260 kg. d'air au maximum à $\frac{1.800}{260 \times 0,237} = 290^{\circ}$.

« En ce qui concerne l'utilisation de la chaleur des gaz perdus qui se dégagent de l'extrémité supérieure du four, l'idéal serait, même pour le procédé sec, de les utiliser dans le four même, ce qui dispenserait de s'en préoccuper autrement.

« En outre, il serait particulièrement avantageux au point de vue de l'installation de l'usine de placer les broyeurs de matières brutes entre le four et le tambour séchoir, et d'effectuer le séchage séparément. Mais cette méthode ne serait économique que si l'on employait des fours de très grande longueur dans lesquels une meilleure utilisation de la chaleur compenserait la dépense de combustible qu'on ferait pour le séchage dans une installation spéciale. Avec des fours de 35 m. de long, les gaz d'échappement contiennent suffisamment de calorique pour qu'il n'y ait lieu de chauffer le séchoir par un foyer spécial qu'au moment de la mise en route. En marche normale les gaz d'échappement suffisent au séchage.

« Il en est de même pour le séchage du charbon. Ce serait une erreur d'employer à cette opération l'air chauffé par son passage sur le clinker dans le tambour refroidisseur au lieu de l'envoyer directement dans le four où son calorique reçoit la meilleure utilisation. D'autant plus que le chauffage spécial pour le séchage du charbon coûte moins cher qu'on ne l'admet généralement. Si l'on se base sur une teneur de 5 à 10 % d'humidité dans le charbon, le séchage de ce dernier exigera la combustion de 1 à 2 kg. de charbon. Or, comme la fabrication du ciment exige 1/4 du même charbon, le séchage de celui-ci par un foyer spécial n'exige qu'une dépense en plus de 1/4-1/2 kg. de combustible, et il n'est pas utile d'enlever ce calorique à l'air de la combustion. »

f) *L'élimination des poussières.* — Cette question n'entre en considération pour le four rotatif que dans la mise en œuvre de matières préparées par le procédé sec. La poudre brute est généralement hydratée légèrement à l'aide d'une vis installée à cet effet devant l'entrée du four; mais la quantité d'eau qu'on y ajoute — 5 à 8 % — est tellement faible qu'elle se vaporise immédiatement après l'introduction de la matière dans le four, de sorte qu'elle ne constitue qu'un faible palliatif contre le dégagement de poussière. En réalité, le dégagement de poussière du four est loin d'être négligeable.

Dans la première période d'emploi du four rotatif, on n'attachait pas une importance suffisante à ce détail de la fabrication; on se contentait d'installer le four immédiatement contre une cheminée étroite et peu élevée, en tôle, qui entraînait toute la poussière à l'exérieur. Mais les désagréments et les pertes de matière pulvérulente brute qu'on éprouvait firent songer au moyen d'y remédier. Actuellement, toutes les installations de fours rotatifs comportent des dispositifs de récupération aussi complète que possible des poussières, mais pour cela il est nécessaire d'installer une canalisation assez longue et spacieuse. Ce détail a pour effet d'augmenter les frais d'installation, mais il est important ; la poussière ne devient pas gênante lorsque cette canalisation est bien comprise. On n'ignore pas qu'en Autriche plusieurs usines ont installé le procédé humide pour obvier aux réclamations soulevées par les dégagements de poussière. Le Dr Bruhn affirme que dans ces usines les carnaux sont mal construits, et que c'est là qu'il faudrait chercher le remède; mais il ne faudrait pas se laisser guider par des raisons de ce genre pour installer un procédé qui ne serait pas dicté par la nature des matières premières.

G. Polysius évacue les poussières d'une manière automatique. A cet effet, il fait déboucher les tuyaux de dégagement des poussières qui partent du canal à fumée dans des vis transporteuses qui ramènent incessamment les poussières dans les silos à poudre brute. Cette installation entraîne évidemment des frais assez élevés, mais elle fournit un moyen radical de se débarrasser des poussières. Elle est très appréciée des praticiens.

Elle est représentée par les figures 104 à 106. Le four rotatif *a* débouche dans la chambre à poussière *b*. La poussière qui s'y précipite se réunit entre les chicanes *d* et s'écoule par des tron-

çons *e* dans une vis transporteuse *f* qui court le long de la chambre à poussières. Dans cette vis transporteuse se rend également par un plan incliné la poussière qui se précipite dans la cheminée. La poussière ainsi recueillie est amenée par la vis dans la cuvette d'un élévateur *g*, celui-ci la déverse dans la trémie *h* qui alimente le four rotatif.

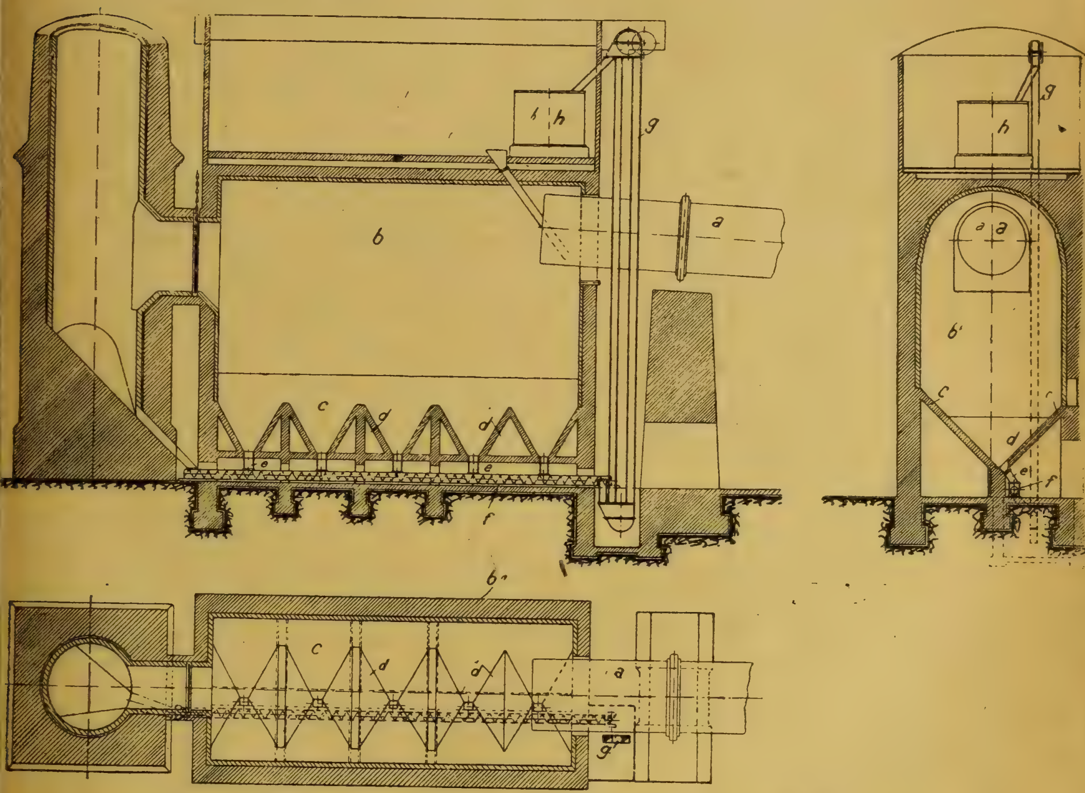


Fig. 104, 105 et 106. — Evacuation automatique des poussières du four et de la cheminée (Polysius)

g) *Rendement. — Dépense de combustible et de force motrice.* — Le rendement d'un four rotatif dépend d'un grand nombre de facteurs et il est dès lors impossible de lui assigner des limites invariables. Il est plus élevé dans la cuisson des matières préparées par voie sèche que pour celles préparées par voie humide, plus faible pour les matières peu fusibles que pour celles qui sont très fusibles, plus élevé pour les fours longs que pour les courts. Pour un four de 35 m. de long, on peut compter en moyenne sur

un rendement journalier de 400 barils de ciment (à 170 kg.), dans la mise en œuvre de matières sèches, et de 300 barils dans la mise en œuvre de matières humides.

La dépense de combustible des fours rotatifs est tout aussi variable que leur rendement, suivant les localités et les circonstances. En supposant qu'on se serve d'un combustible à 7.500 calories, on pourra tabler sur une consommation de 22 à 25 % de charbon sec pour la cuisson de la matière sèche, et de 25 à 50 % pour celle de la matière humide, chiffres ramenés au poids du clinker obtenu.

La force motrice nécessaire pour un four normal est peu considérable en elle-même, soit environ 8 chevaux. Il faut y ajouter celle exigée par le cylindre refroidisseur, le cylindre-séchoir des matières premières, les ventilateurs, les machines de prélèvement dans les silos et de chargement dans le four, le séchoir à charbon, le broyeur à charbon et les appareils servant à éliminer les poussières.

On arrive ainsi, pour une installation (procédé sec) avec 2 fours rotatifs de 35 m. de long, en y comprenant tous les appareils auxiliaires que nous venons d'énumérer, à un total de 240 chx, soit 170 chx pour un four. Dans le procédé humide, on a besoin de moins de force motrice par suite de la suppression du séchage des matières premières, du silo à poudre brute et des appareils d'élimination de la poussière; il faut alors compter environ 85 chevaux pour un four.

TRANSFORMATIONS CHIMIQUES OPÉRÉES PAR LA CUISSON

Les transformations chimiques opérées par la cuisson sont les suivantes :

Tout d'abord l'eau contenue dans les matières premières soit à l'état libre, soit à l'état combiné, est vaporisée. Le carbone et la matière organique sont comburés. L'acide carbonique combiné aux carbonates de chaux et de magnésie est expulsé. Le fer, à l'état de protoxyde, qui se trouve le plus souvent dans l'argile et le calcaire, subit une oxydation presque complète. Le soufre à l'état de sulfure ou de sulfate, ou combiné à la matière organique, disparaît également; on n'en retrouve dans le produit achevé que des traces à l'état de sulfate de calcium. On avait prétendu tout d'abord que le soufre du charbon passait dans le clinker, mais l'ana-

lyse de ce dernier n'en accuse que des traces. Les alcalis (potasse et soude) sont partiellement éliminés par la cuisson. Des expériences faites à ce sujet montrent que les pertes s'élèvent à 19-28 % pour la soude et à 46-52 % pour la potasse.

Dans un rapport lu à la réunion des fabricants de ciment américains, R. Meade a rendu compte d'expériences qu'il a faites en vue de déterminer les pertes résultant de la cuisson du ciment dans le four rotatif. Ces expériences consistaient à analyser les matières premières chargées dans le four, le clinker obtenu et le charbon employé pour la cuisson. Des échantillons furent prélevés dans le four toutes les 3 minutes pendant 5 heures et soigneusement analysés: Les résultats trouvés sont consignés dans le tableau suivant :

Désignation	Composition des matières premières	Composition du clinker	Composition des matières premières rapportées au clinker	Composition du clinker calculée en faisant abstraction de H^2O, CO^2 etc.	Pertes ou gains
SiO^2	13,44	21,06	20,47	21,14	+ 67
TiO^2	0,23	0,32	0,35	0,32	— 03
Al^2O^3	4,55	7,29	6,93	7,32	+ 39
Fe^2O^3	0,56	2,52	2,34	2,66	+ 32
FeO	0,88	0,11	»	»	»
MnO	0,06	0,09	0,09	0,09	00
CaO	41,84	63,55	63,72	63,80	+ 08
MgO	1,94	2,95	2,94	2,97	+ 03
Na^2O	0,31	0,38	0,47	0,38	— 09
K^2O	0,72	0,59	1,10	0,59	— 51
P^2O^5	0,22	0,34	0,34	0,34	— 00
SO^3	»	0,30	1,25	0,38	— 87
S	0,33	0,03	»	»	»
C	0,75	»	»	»	»
CO^2	32,94	0,32	»	»	»
H^2O	1,55	0,24	»	»	»

On voit dans les 2e et 3e colonnes la composition des matières premières et du clinker. La 4e colonne indique la composition qu'auraient les matières après la cuisson du ciment si les modifications auxquelles celle-ci donne lieu se bornaient à l'oxydation de l'oxyde ferreux et du soufre, à la combustion du carbone et à la vaporisation de l'eau et de l'acide carbonique. Enfin, la 5e colon-

ne contient l'analyse du clinker calculé à 100 %, abstraction faite de l'eau et de l'acide carbonique, le soufre étant calculé en SO^3 et le fer en Fe^2O^3.

Le charbon employé contenait :

Humidité			1,34
Matières volatiles combustibles			34,11
Carbone fixe			54,03
Cendres —	SiO^2	3,59	
	TiO^2	0,08	
	Al^2O^3	1,50	
	Fe^2O^3	1,91	
	MnO	0,03	
	CaO	0,75	
	MgO	0,03	
	Na^2O	0,10	
	K^2O	0,16	
	P^2O^5	0,06	
	SO^3	0,54	8,75
Soufre			1,77
			100,00

La quantité de charbon nécessaire pour obtenir 100 kg. de clinker était de 29 kg., qui contenaient par conséquent :

	Kilogrammes
SiO^2	1,04
TiO^2	0,02
Al^2O^3	0,44
Fe^2O^3	0,55
MnO	0,01
CaO	0,22
MgO	0,01
Na^2O	0,03
K^2O	0,05
P^2O^5	0,02
SO^3 (S total)	1,43

Si l'on compare ces chiffres avec ceux de la dernière colonne du tableau donné plus haut, on remarquera que la teneur du clinker en silice, oxyde ferrique et alumine s'est accrue d'environ la moitié des cendres du charbon. Il est hors de doute qu'une grande partie des cendres produites dans le four rotatif est entraînée avec les gaz de la combustion par le tirage. On est amené à cette conclusion si l'on considère que les particules de cendre sont de même volume que celles de charbon, mais dix fois plus légères. Les gaz de la combustion se dégagent avec une vitesse d'environ 700

m. par minute, largement suffisante par conséquent pour entraîner ces particules de cendre par la cheminée. Il est donc probable que la partie des cendres qui vient se mélanger au ciment est déposée par la flamme soit sur le clinker, soit sur la masse en fusion. On peut admettre que moins la poussière de charbon est fine, plus celui-ci déposera de cendres sur le clinker. Il est important de connaître le point où elles se déposent. Si elles se déposent sur la matière avant qu'elle ne se solidifie, il sera nécessaire d'ajouter 4 kg de carbonate de chaux par 100 kg. de matières premières, en vue de neutraliser l'effet de ces cendres. Si, au contraire, elles se déposent sur le clinker après sa solidification, elles ne se combinent pas avec lui, mais forment simplement un enduit superficiel.

Si maintenant nous reprenons la composition du clinker en tenant compte d'une part de la volatilisation du soufre, de la potasse et de la soude, de l'autre de l'addition de la moitié des éléments des cendres du charbon, nous lui trouverons la composition suivante :

SiO^2	21,09
TiO^2	0,36
Al^2O^3	7,17
F^2O^3	2,62
MnO	0,09
CaO	63,99
MgO	2,95
Na^2O	0,39
K^2O	0,61
P^2O^5	0,35
SO^3	0,38

Un autre point mis en lumière par ces expériences est la perte de matières sous forme de poussières, et dégagées soit dans le broyage des matières premières, soit dans la cuisson du ciment. En tenant compte des pertes résultant de la volatilisation de la soude, de la potasse et de soufre, et du gain résultant de l'addition de la moitié des cendres du charbon, on trouve que 100 kg. de matière première donnent 67 kg. 250 de clinker ; d'après cela, il faudrait employer 252 kg. de matières premières pour obtenir un baril de ciment de 170 kg. ; or, l'expérience montre qu'il faut en moyenne 267 kg., ce qui prouve que la perte par les poussières, etc., est assez élevée par baril de ciment.

Les transformations que nous venons de signaler sont celles révélées par l'analyse comparative des matières premières et des produits obtenus. Mais ces transformations sont insuffisantes par elles-mêmes pour donner du ciment Portland. Pour qu'il se forme du ciment, il faut que la chaux se combine avec la silice et l'alumine ; or, cette combinaison s'effectue à une température beaucoup plus élevée que celle requise pour l'expulsion de l'acide carbonique. Il est intéressant de suivre les transformations successives que subissent les matières premières dans les diverses phases de la cuisson. Les expériences faites dans ce but par W. B. Newberry présentent donc un grand intérêt, et nous allons les résumer brièvement.

Pendant l'arrêt momentané d'un des fours rotatifs à l'usine de la Dexter Portland Cement Co, à Nazareth (Pa.), on laissa refroidir ce four sans le vider et on préleva des échantillons de la charge sur toute la longueur du four, de quatre pieds en quatre pieds.

Le premier échantillon (cru) fut prélevé au point d'introduction des matières dans le four, et le dernier, formant le n° 14 (clinker cuit à point) à quatre pieds au-dessus du point de décharge. Ces échantillons furent broyés finement, dissous dans de l'acide chlorhydrique de concentration moyenne et analysés. Les résultats de l'analyse sont consignés dans le tableau suivant :

N°ˢ	SiO^2	Fe et Al	CaO	MgO	Perte à la calcination
1	13,70	6,00	42,12	1,97	35,30
2	13,65	5,58	41,95	1,96	35,04
3	14,38	5,70	41,63	1,88	34,84
4	13,55	6,20	41,98	2,12	23,46
5	14,33	6,27	44.05	1,65	32,76
6	14,46	6,36	44,67	1,89	30,56
7	14,90	6,55	46,19	2,30	28 38
8	16.44	6,99	49,25	2,33	24,94
9	17,03	7,80	53,04	2,30	18,44
10	17,94	8,50	56,20	2,35	13,04
11	18,60	9 04	59,00	2,70	8,32
12	18,66	9 75	62,68	2,80	4,34
13	19,90	10,76	63,38	2,83	1,08
14	20,36	10,78	63,76	2,81	0,86

Il résulte de ces expériences que la cuisson dans le four rota-

tif s'effectue, non graduellement comme on l'avait d'abord supposé, mais d'une manière ininterrompue d'un bout à l'autre : l'humidité est vaporisée et la matière organique comburée dès que les matières prennent la température qui règne à l'extrémité supérieure du four ; cette transformation se manifeste par la couleur qui passe du gris sale à la nuance crème entre 3 et 4. L'acide carbonique est brûlé ensuite ; les n°s 4 et 5 prélevés à 20 pieds de l'extrémité supérieure accusaient une perte de poids bien accentuée. A mesure que l'acide carbonique est comburé, la proportion des éléments solides augmente ; les plus grands changements se produisant entre 8 et 20 où la température passe du rouge clair au blanc. Cependant, les dernières parties des matières volatiles ne sont éliminées du clinker que lorsqu'il est entièrement calciné et sur le point de quitter le four ; à ce moment il n'en contient plus que 0,86 %.

Les modifications physiques des matières premières depuis leur introduction dans le four jusqu'à leur transformation en clinker sont caractérisées dans les différents échantillons.

Les n°s 1, 2 et 3 forment une poudre gris sale, virant au crème entre les n°s 3 et 4.

Les n°s 4, 5 et 6 se présentent sous forme de poudre jaunâtre qui commence à s'amalgamer dans le n° 6.

Les n°s 7, 8, 9 et 10 forment des grumeaux dont la couleur va du jaune au brun, s'écrasant facilement sous les doigts, se durcissant davantage et devenant plus foncés vers le n° 10.

Le n° 11 forme des grumeaux durs, brun foncé, accusant des traces de scorification à la surface, moins durs vers l'intérieur.

Le n° 12 est à l'état de grumeaux bruns partiellement scorifiés, durs, de forme arrondie.

Le n° 13 se présente à l'état de grumeaux plus grands, irréguliers, d'un toucher rugueux. Il existe entre les n°s 12 et 13 une différence bien tranchée ; ce dernier est brunâtre, semblable à du clinker, et calciné de part en part.

Le n° 14 forme des grumeaux noirs, plus petits et plus arrondis, qui possèdent toutes les apparences du clinker achevé.

Campbell (1) à son tour fit de nombreuses expériences de cuisson de mélanges composés de marne et de craie en différentes

(1) *Journ. Amer. Chem. Soc.*, XXIV, p. 969.

proportions dans un petit four rotatif muni d'un pyromètre de Le Chatelier, et étudia les propriétés du clinker obtenu à différentes températures. Ces expériences lui permirent de déterminer la température de cuisson de la plupart des ciments du commerce ; cette température est de 1550° C, elle est un peu plus élevée pour les ciments riches en chaux. Ainsi, par exemple, un mélange de marne et d'argile, dans lequel le rapport des silicates ($SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3$) à la chaux (CaO) était de 100 : 228,8, et qui avait donné un clinker à 62,64 % de chaux, a exigé une température de 1549° ; le même mélange, dans lequel le rapport des silicates à la chaux était de 100 : 240,8 et qui avait donné un clinker à 63,83 % de chaux, a exigé une température de 1593° C. Un troisième mélange de ces matières, dans lequel le rapport de silice-chaux était de 100 : 266,4, a donné un clinker à 66,12 % de chaux dont la cuisson n'était pas encore achevée à 1625° C.

Dans ces mêmes expériences Campbell a trouvé que le mélange de marne et d'argile dont la cuisson exigeait une température de 1549° C pouvait être cuit convenablement à la température de 1478° quand on faisait tourner le four rotatif à une allure plus lente. On trouve dans ce fait l'explication d'un phénomène souvent constaté par les fabricants, savoir : qu'en prolongeant le séjour du clinker dans le four rotatif on obtenait le même résultat qu'en opérant à une température plus élevée.

Dans une seconde expérience, Campbell et Ball (1) étudièrent l'influence exercée par la finesse du broyage des matières premières sur la cuisson du ciment. Un mélange de matières premières broyées à la finesse correspondant à un refus de 23,6 % sur le tamis n° 200 ne se cuisait pas complètement à la température de 1612° C, tandis que lorsqu'il était broyé à une finesse correspondant à 2 % de refus sur le même tamis, sa cuisson s'effectuait à la température de 1475° C. Cette expérience montre que la finesse du broyage joue un grand rôle dans la dépense de combustible.

Nous avons déjà fait ressortir plus haut le rôle des fondants (alcalis, oxyde de fer) dans la scorification du clinker ; il nous paraît donc inutile d'y revenir.

---

(1) *Journ. Amer. Soc.*, XXV, p. 1103.

THERMOCHIMIE DE LA CUISSON DU CIMENT PORTLAND

La question de l'utilisation de la chaleur produite dans les fours rotatifs pour effectuer la transformation de la farine ou de la pâte en clinkers de ciment Portland a été spécialement étudiée par R. Meade, chimiste à la Dexter Portland Ciment Cie de Nazareth, Pa. (Etats-Unis), en se basant sur des expériences faites dans l'usine ci-dessus désignée. Nous ne saurions mieux faire que de résumer ici cette intéressante étude (1).

Comme nous l'avons vu par ce qui précède, la cuisson du ciment Portland donne lieu à des réactions profondes : élimination de l'eau d'addition, de l'eau combinée et de l'acide carbonique, combustion des matières organiques et du soufre contenu à l'état de sulfures, combinaison de la silice et de l'alumine avec la chaux, décomposition des sulfates et expulsion du soufre des sulfates, volatilisation partielle des alcalis et oxydation du protoxyde de fer.

Ces réactions produisent de la chaleur ou bien en absorbent.

La combustion du soufre des sulfures et celle des matières organiques contenues dans les matières premières dégagent de la chaleur. La décomposition du carbonate de chaux et du carbonate de magnésie en acide carbonique et oxyde de calcium ou de magnesium absorbe de la chaleur. Il n'est pas absolument certain, comme quelques observateurs le prétendent, que la combinaison de la silice et de l'alumine avec la chaux dégage de la chaleur ; du moins cette supposition n'est pas restée sans contradiction.

Pour l'établissement de ses calculs, Meade se sert des valeurs suivantes :

1 kg de carbone, en se transformant en acide carbonique, donne....................................	8.080	calories
1 kg de soufre, en se transformant en acide sulfureux, donne	2.250	calories
1 kg de carbonate de chaux absorbe, d'après Berthelot, dans sa décomposition en acide carbonique et chaux	436	»
1 kg de carbonate de magnésie absorbe, d'après Berthelot, dans sa décomposition en acide carbonique et magnésie....................................	213	»

(1) D'après *The Chemical Engineer* 1906. — *Tonindustrie Zeitung*, 1906, p. 793. — Cf. *Rev. des matér. de construction*, 1906.

1 kg de chaux vive donne, d'après Berthelot, en se combinant avec la silice et l'alumine pour former des silicates ou des aluminates.........................	591	»
D'où un kg de carbonate de chaux contenant 0 kg 56 de chaux vive donnera, en se combinant à la silice ou à l'alumine....................................	331	»

100 kg. de farine de ciment ayant servi à Meade contenaient 75 kg. de carbonate de chaux, 4 kg. de carbonate de magnésie, 0 kg. 8 de carbone à l'état de combinaisons organiques et 0 kg. 3 de soufre à l'état de sulfures.

Il en résulte que :

Pour décomposer 75 kg de carbonate de chaux, il faux 75 × 436......	32.700 calories	
Pour décomposer, 4 kg de carbonate de magnésie, il faut 4 × 213.....	852 »	33.552 calories
La combustion de 0 kg,3 de soufre, donne 0,3 × 2.550...............	675 »	
La combustion de 0 kg,8 de carbone donne 0,8 × 8,080.................	6.464 calories	7.139 calories
La cuisson de 100 kg de farine exige donc..........		26.413 calories

Pour produire un baril de ciment, il faut, à Nazareth, environ 270 kg. de farine, dont la cuisson exige :

$$\frac{26.413 \times 270}{100} = 71.315 \text{ calories}$$

La houille de Fairmont employée pour la cuisson du ciment produit 7.778 calories par kg. ; il faudra donc pour cuire un baril de ciment :

$$\frac{71.315}{7.778} = 9 \text{ kg. } 17 \text{ de houille.}$$

Si l'on admet que la combinaison de la chaux avec la silice et l'alumine donne 331 calories pour chaque kg. de carbonate de chaux contenu dans la matière première, il faudra retrancher :

$$75 \times 331 = 24.825 \text{ calories,}$$

de sorte qu'en réalité on n'aura besoin que de

26.413 calories
24.825 »
1.588 calories

soit $\frac{1.588}{7.778}$ = 0 kg 204 de houille pour faire cuire 100 kg. de ma-

tières premières, ou encore 0 kg. 55 de houille par baril de ciment. Ce chiffre est si faible que l'on ne peut lui accorder aucune créance. Par conséquent, ou la valeur donnée par Berthelot est trop élevée, ou bien la combinaison de la chaux avec la silice et l'alumine ne dégage généralement pas de chaleur.

En réalité, on ne peut faire cuire un baril de ciment avec 71.315 calories. Cela ne serait possible que si les gaz et les clinkers ne quittaient pas le four à une température supérieure à celle de l'air extérieur, et si l'on pouvait empêcher toute perte de chaleur par rayonnement. On devrait aussi condenser la vapeur d'eau contenue dans les gaz sortants et utiliser complètement la chaleur ainsi obtenue. Mais comme il n'en est pas ainsi dans la pratique, on doit produire une plus grande quantité de chaleur, dont le calcul demande d'abord quelques constantes.

1° La quantité d'air nécessaire à la combustion.

Pour transformer 1 kg. de carbone en acide carbonique, il faut 11 kg. 6 d'air.

Pour transformer 1 kg. d'hydrogène en eau, il faut 34 kg. 8 d'air.

Pour tranformer 1 kg. de soufre en acide sulfureux, il faut 4 kg. 4 d'air.

2° Poids des produits de la combustion.

1 kg. de carbone brûlant dans l'air donne 3 kg. 66 d'acide carbonique et 8 kg. d'azote.

1 kg. d'hydrogène brûlant dans l'air donne 9 kg. d'eau et 26 kg. 8 d'azote.

1 kg. de soufre brûlant dans l'air donne 2 kg. d'acide sulfureux et 3 kg. 35 d'azote.

3° Pour transformer 1 kg. d'eau en vapeur, il faut 537 calories.

4° La chaleur spécifique des matières entrant dans le calcul :

Chaleur spécifique des produits de la combustion du charbon..	0,251
» » de l'acide carbonique....................	0,234
» » de l'oxyde de carbone....................	0,245
» » de l'air..................................	0,238
» » de la vapeur d'eau.......................	0,480
» » de l'eau..................................	1,000
» » des clinkers de ciment Portland..........	0,246

La houille utilisée à Nazareth avait la composition suivante :

Eau	1,9 %
Carbone	74,9 »
Hydrogène	4,8 »
Oxygène	8,6 »
Azote	1,4 »
Soufre	0,7 »
Cendres	7,7 »
	100,0 %

Si l'on fait abstraction de la petite quantité de soufre contenue dans la houille, on voit que la quantité d'air nécessaire pour la combustion complète de ce charbon est la suivante :

Pour le carbone, $74,9 \times 11,6$ .... 869 kilogrammes d'air

» l'hydrogène $\left(4,8 - \frac{8,6}{8}\right) \times 34,8$ .... 129 » »

Total .... 998 kilogrammes d'air

soit, en chiffres ronds, 10 kg. d'air pour 1 kg. de houille.

Les produits de la combustion de 100 kg. de houille pèsent donc :

$$998 + (100 - 7,7) = 1.090 \text{ kg. en chiffres ronds,}$$

c'est-à-dire qu'ils comprennent l'air nécessaire et la partie volatile du charbon. 1 kg. de houille donne donc 10,9 kg de gaz brûlés.

La combustion de 74 kg. 9 de carbone donne $74,9 \times 3,66 =$ environ 274 kg. d'acide carbonique et $74,9 \times 8,94 =$ environ 669 kg. d'azote. Les 8 kg. 6 d'oxygène contenus dans 100 kg. de houille suffisent pour brûler 1 kg. 1 d'hydrogène; il reste donc environ $4,8 - 1,1 = 3$ kg. 7 d'hydrogène.

La combustion de 3 kg. 7 d'hydrogène donne $3,7 \times 9 = 33$ kg. d'eau et $3,7 \times 26,8 = 99$ kg. d'azote.

Nous avons maintenant, en plus, pour 100 kg. de houille, 1 kg. 9 de vapeur d'eau provenant de l'humidité naturelle de la houille et $8,6 \times \frac{8,6}{8} = 9$ kg. 7 d'eau provenant de l'oxygène du charbon, soit en tout 44 kg. 6 de vapeur d'eau. Les gaz brûlés se composent donc de 768 kg. d'azote, 274 kg. d'acide carbonique et 45 kg. de vapeur d'eau pour 100 kg. de houille brûlée. On peut ainsi calculer la valeur approchée de la chaleur spécifique des gaz :

Azote	768	× 0,244 =	187,4
Acide carbonique	274	× 0,234 =	64,1
Vapeur d'eau	45	× 0,480 =	21,6
	1.087		273,1

d'où chaleur spécifique des gaz de la combustion $\frac{273,1}{1,087} = 0,251$, c'est la valeur donnée plus haut.

L'expérience a montré que la température des gaz des fours rotatifs était de 800 à 1.200° à l'extrémité supérieure et qu'ils contiennent un excès d'air de 15 à 30 %. Dans les calculs suivants, on a pris, comme valeur de l'excès d'air, 20 %, et comme température à l'extrémité du four 1.055°. Pour un baril de ciment de 170 kg., on brûle en moyenne 45 kg. de houille et les matières premières produisent 90 kg. d'acide carbonique.

On peut maintenant calculer la quantité de chaleur qui est perdue par la cheminée.

	Calories pour chaque degré centigrade au-dessus de la température de l'air	Calories perdues dans les fumées
Dans les gaz de la combustion de 45 kilogram. de houille, il y a 45 × 10,9 × 0,251	123,1	
Dans l'acide carbonique provenant de matières premières, il y a 90 × 0,234	21,1	
Dans l'excès d'air, il y a	21,4	
	165,6	
Si l'air extérieur est à 10° C, les gaz sortants contiennent 165,6 (1.065 — 10)		174.708
Si les matières premières contiennent 2 % d'humidité il faudra donc chauffer, pour un baril de ciment, 0,02 × 270 = 5 kg,4 d'eau de 10° C à 100° ; il faudra pour cela 5,4 × 90 = 486 calories.		
Pour transformer ces 5 kg,4 d'eau à 100° C. en vapeur 100°C., il faut encore 5,4 × 537 = 2.900 calories.		
Maintenant, il faut chauffer cette vapeur à 1.065°C., ce qui nécessite 5,4 (1.055 — 100) × 0,48 = 2.501 calories. La vapeur d'eau provenant des matières premières et mélangée aux fumées emportera donc 486 + 2.900 + 2.501		5.887
Les fumées emporteront donc		180.595

Comme 1 kg. de houille de Fairmont produit 7.778 calories, il sera perdu avec les fumées $\frac{180.595}{7.778}$ = 23 kg. 2 de houille pour chaque baril de ciment produit dans le four rotatif.

Mais il y a aussi de la chaleur qui est perdue par les clinkers. Un baril de ciment correspond à 171 kg. de clinkers qui sortent habituellement du four à 1.180° C. Ce qui correspond à une perte de chaleur de $171 \times 0{,}246 \times (1.180 - 10) = 49.217$ calories.

Les clinkers donnent donc lieu à une perte de $\frac{49.217}{7.778} = 6$ kg. 3 de houille.

Avec la chaleur perdue dans les fumées, nous arrivons donc à une perte de 29 kg. 5 par baril de ciment. Si l'on admet maintenant que la combinaison de la chaux avec la silice et l'alumine ne donne pas lieu à dégagement de chaleur, les réactions chimiques de la cuisson du ciment demandent 9 kg. 2 de houille (de sorte qu'il y a encore par rayonnement une perte de chaleur correspondant à $45 - (29{,}5 + 9{,}2) = 6$ kg. 3 de houille, sur laquelle glisse l'auteur).

Maintenant, quelle quantité de charbon devrait-on réellement consommer ? Meade répond à cette question de la manière suivante : On devrait pouvoir extraire des gaz assez de chaleur pour que la cheminée ne les reçoive qu'à 230° C., comme c'est couramment le fait dans de nombreux cas de chauffage de chaudières.

On pourrait refroidir les clinkers à 65° C. en récupérant la chaleur. L'excès d'air s'élève encore à 20 %. Soit x la quantité de houille % qui serait nécessaire dans ces conditions.

Nous avons :

	Calories pour chaque degré au-dessus de la température moyenne
Dans les gaz de la combustion de x kg de houille, $x \times 10{,}9$ 0,251	$2{,}74\,x$
Dans l'acide carbonique provenant de la farine	21,1
Dans les 20 % d'excès d'air $x \times 0{,}234 \times 10 \times 0{,}20$	$0{,}48\,x$

Cette quantité de gaz quitte le four à une température supérieure de 220° à celle de l'air extérieur et emporte donc :

$$220\,(21{,}1 + 3{,}22\,x) = 4.642 + 700{,}4 \times x \text{ calories.}$$

Pour transformer les 5 kg. 4 d'eau à 10° C. contenus dans les matières premières en vapeur à 100° C., il faut, d'après un calcul précédent, 3.386 calories. Pour chauffer cette vapeur à 230°, il faudra $5{,}4 \times 130 \times 0{,}48 = 336$ calories, de sorte que l'eau des matières premières emporte en tout $3.386 + 337 = 3.723$ calories. Il part donc en tout par la cheminée $4.642 + 3.723 + 708{,}4 \times x$ calories.

Les 170 kg. de clinker emportent, lorsqu'on les refroidit à 65°, 170 × 0,246 × (65 — 10) = 2.299 calories.

Les réactions chimiques nécessitent 71.315 calories par baril de ciment, de sorte que l'on a besoin en tout de

$4.642 + 708,4\,x + 3.733 + 2.299 + 71.315 = 708,4\,x + 81.989$ calories.

Et comme 1 kg. de houille produit 7.778 calories, on a :

$$808,4\,x + 81.989 = 9.788\,x.$$

d'où :

$$x = \frac{81.989}{7.079,6} = 11 \text{ kg. } 6.$$

On pourrait ainsi faire cuire un baril de ciment avec 11 kg. 6 de houille ayant un pouvoir calorifique de 7.800 calories environ (ou, si on considère les pertes par rayonnement ou autres, ce que Meade a omis de faire) avec 11,6 + 6,3 = 17 kg. 9, soit en chiffre ronds, 18 kg.

L'excès d'air de combustion a été souvent donné comme s'élevant de 100 à 150 % dans la pratique. Ces chiffres sont erronés parce que, dans les expériences sur lesquelles on s'est basé, les échantillons de gaz ont été prélevés dans la cheminée et qu'on n'a pas tenu compte de l'air aspiré par la fente annulaire qui existe à l'extrémité du four. Les gaz devraient plutôt être prélevés à l'extrémité du four. Les fumées prélevées, analysées ci-dessous, ont été faites dans des fours en exploitation régulière.

Désignation	Fumées blanches légères à l'extrémité de la cheminée	Fumées noires épaisses à l'extrémité de la cheminée	Il sort des flammes de la cheminée
Acide carbonique	27,4 %	19,2 %	14,2 %
Oxyde de carbone....	0,9 »	1,2 »	5,8 »
Oxygène..............	2,7 »	3,4 »	1,1 »
Azote	69,6 »	76,2 »	78.9 »
	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Abstraction faite de la petite quantité d'azote contenue dans la houille, l'azote du gaz d'échappement provient de l'air qui est entré dans le four. L'oxygène provient de l'excès d'air. Si l'on multiplie cette teneur en oxygène par 3,78, on obtient la quantité d'azote qui l'accompagne.

En retranchant ce nombre de la quantité total d'azote, on ob-

tient l'azote contenu dans la quantité d'air nécessaire à la combustion. En appliquant ce raisonnement à la première analyse, on obtient :

Teneur totale en azote.	69,6 %
Azote contenu dans l'excès d'air 2,7 × 3,78	10,2 »
Azote contenu dans l'air nécessaire	59,4 %

En appelant x la quantité totale d'air, on a :

$$\frac{59,4}{69,6} = \frac{100}{x}$$

d'où

$$x = 167$$

on a donc un excès d'air de 17 %. Ce calcul donne lieu à des erreurs, mais il doit suffire pour les besoins pratiques à cause de sa simplicité.

Comment peut-on maintenant utiliser économiquement la chaleur des gaz sortants et celles des clinkers? Robert-F. Wentz, Lathbury et Spackmann envoient l'air sur les clinkers chauds, l'air est aini chauffé et les clinkers sont refroidis en même temps. On commet souvent ici la faute de faire trop faible le ventilateur qui doit envoyer l'air sur les clinkers, car on oublie qu'on a un volume d'air plus considérable à refouler qu'à aspirer, par suite de l'augmentation de volume qui a lieu pour une élévation de température de 10 à 300° C.

Pour ce qui concerne l'utilisation de la chaleur contenue dans les gaz sortants, on a proposé deux procédés. Les uns construisent des fours très longs, les autres envoient les gaz sortant des fours courts sous des chaudières, puis dans des surchauffeurs. Les plus longs fours ont été contruits par T.-A. Edison à Stewartsville, ils ont 45 m. 75 de long et travaillent si économiquement au point de vue de la consommation de charbon, que toute une série d'autres usines procèdent à l'augmentaion de la longueur des vieux fours. Avec un four de 45 m. de long et de 2 m. 10 de diamètre intérieur, Meade a obtenu 500 à 600 barils de ciment par jour, et cela pour une consommation de 33 kg. 75 à 36 kg. de houille par baril. Les fours ayant 24 m. de long pour un même diamètre produisent 250 à 300 barils et consomment 40 kg. 5 à 43 kg. de houille par baril; la production courante d'un four de 30 m. de long et de 2 m. 10 de diamètre intérieur est de 350 à 400 barils et il consomme 38 à 40 kg. de houille par baril.

Un four de 30 m. de long cuisant de la pâte produit journellement 150 barils et demande 49 kg. 5 de houille par baril. La production croît dans des limites déterminées avec le diamètre, mais la consommation de charbon croît en même temps. Les plus nouveaux fours d'Edison ont un diamètre de 2 m. 70.

Les premières expériences qui ont été faites à Nazareth pour envoyer les gaz d'échappement sous les chaudières ont donné de très mauvais résultats, de sorte que l'on rejeta ce procédé de travail. A l'usine de la Cayuga Lake Cement C° et à celle de la Cosmos Portland Cement C°, on obtint de meilleurs résultats. La première, qui produit 600 barils de ciment par jour, possède 4 fours rotatifs; les gaz d'échappement de 2 fours furent envoyés sous une chaudière fixe ayant 270 m² de surface de chauffe. D'après le compte rendu publié par Carpenters dans le *Sibley Journal of Engineering* (mars 1904), la chaudière chauffée uniquement avec les gaz d'échappement produisit 257,5 HP. Il semble cependant que le meilleur moyen d'utiliser la chaleur du charbon est encore l'emploi des longs fours.

Meade a calculé que l'on devrait donner aux fours rotatifs une longueur de 75 m. sans augmenter leur diamètre si l'on voulait refroidir les gaz de la combustion à 200° C. Edison n'est pas encore allé aussi loin, et il ne faut pas oublier que les pertes par rayonnement croissent avec la longueur du four, ce qui n'est pas négligeable.

CHAPITRE VII

MOUTURE DES CLINKERS. — SILOTAGE ET ENSACHAGE DU CIMENT

Le clinker bien cuit se présente sous forme d'une masse très dense, vert grisâtre, rugueuse au toucher comme le coke. Quand il vient d'être extrait du four, il oppose une très grande résistance et son broyage exige une dépense de force considérable. On obvie à cet inconvénient d'une manière très simple, en le conservant pendant quelque temps sous un hangar ouvert et bien exposé aux courants d'air. Au bout de quelques jours, la matière s'effrite à la surface, et en même temps sa coloration devient plus claire ; suivant l'intensité de la cuisson et la composition du ciment, cette transformation se poursuit avec une telle régularité que dans l'espace de 15 jours parfois la masse rugueuse se transforme en poudre grossière mélangée de roches qui ont résisté à l'effritement. Le clinker cuit très fortement conserve sa texture serrée pendant des semaines et des mois; mais c'est là un fait plutôt exceptionnel, les fabricants de ciment ayant intérêt à ne pas dépenser plus de charbon que n'en exige une cuisson normale.

Mais, il y a encore un autre motif d'agir de la sorte : le ciment le mieux cuit peut parfois contenir encore un peu de chaux libre, qui est rendue inoffensive par l'action de l'air; c'est pourquoi il y a lieu de le conserver pendant un certain temps, de préférence sous forme de clinker, d'abord parce qu'en cet état il a moins de valeur qu'à l'état de poudre fine, ensuite parce qu'il s'effrite et est plus facile à broyer, ainsi que nous l'avons fait observer plus haut.

La conservation du clinker sous hangar présente donc des avantages au point de vue des frais de construction et du rapide effri-

tement de la matière sous l'influence de l'air. Mais, si l'emmagasinage par les moyens de transport mécanique se fait aisément, il n'en est plus de même pour les prélèvements, qui ne peuvent se faire alors qu'avec le concours d'une main-d'œuvre coûteuse et pénible par suite du dégagement de poussière. Ces considérations ont incité les fabricants à conserver le clinker dans des silos fermés, entièrement en fer.

La figure 107 représente une installation de ce genre. Dans cette gravure d^{1-3} sont des silos en fer d'une capacité utile de 5.500 m³. Le clinker, qui est amené du four au moyen d'une gouttière « Torpedo » *a*, est élevé par l'élévateur *b* dans une seconde gout-

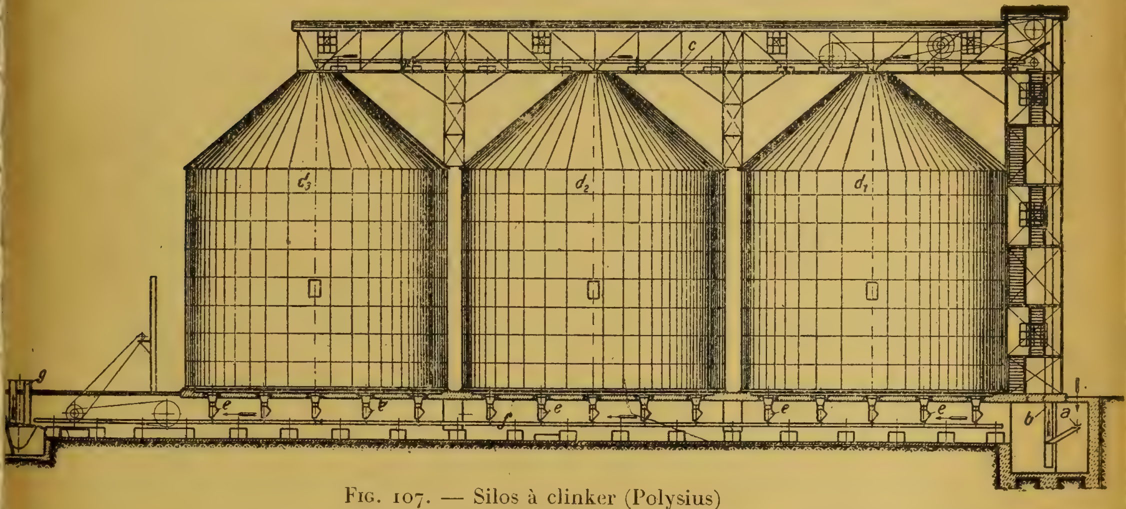


Fig. 107. — Silos à clinker (Polysius)

tière *c* qui le répartit dans les silos. Ceux-ci sont munis à la partie inférieure d'une série de dispositifs *e* pour le prélèvement, actionnés par le mécanisme de la gouttière *f* placée en-dessous; un second élévateur *g* conduit la matière aux broyeurs.

En l'état actuel du progrès technique, la mouture du ciment est chose bien simple et s'effectue avec un outillage peu compliqué. D'une manière générale, cette opération comprend trois phases qui sont : le concassage à l'aide de concasseurs pour les clinkers produits dans les fours verticaux, le broyage intermédiaire à l'aide de moulins à boulets ou de broyeurs à meules, et la mouture fine à l'aide de tubes broyeurs. Les moulins à meules, eu égard à leur consommation de force motrice et aux frais de répa-

ration et d'entretien qu'ils exigent, ne sont plus employés pour la mouture du clinker; lorsqu'ils sont tout installés et qu'on ne veut pas s'en défaire, on les emploie au broyage intermédiaire, on tamise la poudre obtenue et on envoie le gruau resté sur le tamis au tube broyeur pour le réduire en poudre fine.

D'autres fois on s'arrange de manière à concasser la matière plus finement que de coutume en combinant le concasseur avec des broyeurs cylindriques et achevant ensuite la mouture à l'aide d'un tube broyeur ou d'un autre broyeur combiné avec le séparateur à air.

INFLUENCE DE LA FINESSE DU BROYAGE SUR LES PROPRIÉTÉS DU CIMENT PORTLAND

On sait que la finesse du ciment influe considérablement sur la résistance du mortier, qui est une de ses propriétés essentielles. Mais, les frais de mouture augmentent avec la finesse du produit et il arrive un moment où les dépenses de force motrice et de réparations sont absolument hors de proportion avec les autres frais de fabrication. Pour concilier autant que possible les intérêts en présence, les fabricants de ciment ont pris comme règle de moudre aussi finement que le permet la rémunération du travail. On considère comme finesse moyenne celle à laquelle le ciment donne 1 à 2 % de refus sur le tamis à 900 mailles et 18 à 20 % sur le tamis à 5.000 mailles.

Nous avons vu aussi que, si l'on a avantage à broyer le ciment le plus finement possible, on doit de même broyer les matières premières à la plus grande finesse possible afin d'obtenir un ciment très basique dans lequel la quantité maxima de chaux entre en solution dans la pâte.

Si l'on sépare du ciment les particules les plus fines, non pas seulement celles qui passent au tamis n° 200, mais encore la fine poussière, on constate généralement pour cette partie une prise normale, ce qui montre qu'il est possible de réduire au moins une partie du ciment en fine poussière. On admet généralement que c'est cette fine poussière qui est le constituant actif du ciment, et que les parties grossières constituent des éléments inertes qu'il est bon de séparer ou tout au moins de rendre actifs par le broyage. Le problème consiste donc à éliminer les éléments inertes des clinkers et à accroître les éléments utiles.

Les machines actuelles de broyage permettent de broyer le ciment à une finesse telle qu'il ne laisse pas de refus sur le tamis n° 200, et il y a lieu d'espérer que cette base sera adoptée par le commerce. En somme, les expériences faites à ce sujet indiquent une solution.

Meade (1) a fait un certain nombre d'expériences pour déterminer l'effet du broyage fin sur la résistance à la traction du ciment Portland. Ces essais ont démontré que :

1° La résistance de la pâte pure diminue un peu avec la finesse du broyage; 2° la résistance du mortier (ciment-sable) augmente avec la finesse du broyage. Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus dans une expérience faite avec le plus grand soin. Chaque nombre représente la moyenne de cinq broyages. Les cinq échantillons sont d'un même lot de ciment. On en fit 5 parts que l'on broya à différentes finesses.

Refus au tamis n° 200	Refus au tamis n° 100
80 %	93,9 %
85 »	95,8 »
90 »	97,4 »
95 »	99,0 »
100 »	100,0 »

Résistances d'un même ciment broyé à des finesses variables.

Durée	Nature	Refus au tamis n° 200				
		20 %	15 %	10 %	5 %	0 %
1	Pâte pure	369	241	308	282	200
7	»	955	796	749	627	558
28	»	963	849	775	626	594
7	Mortier 1-3	235	284	351	363	382
28	» 1-3	297	353	468	498	573
7	Mortier 1-4	160	204	234	247	263
28	» 1-4	224	266	324	377	392

En examinant ce tableau on y remarque un certain nombre de points intéressants. Tout d'abord la résistance en pâte pure dé-

(1) D'après un rapport présenté à la Société Américaine pour l'essai des matériaux. — Cf. *Revue des matériaux de construction*, janvier 1910.

croît avec la finesse du broyage. Cette diminution varie comme suit :

Par rapport aux résistances après 7 jours et 28 jours, données par un ciment à 20 % de refus, on constate que pour des ciments à 15 %, 10 %, 5% et 0% de refus, ces résistances ont diminué respectivement de 17 et 11 %, 21 et 20 %, 34 et 35 %, et enfin 42 et 38 %.

En général la diminution de la résistance en pâte pure, due à la finesse du broyage, est à peu près la même pour les périodes de 7 et 28 jours.

En considérant les essais de mortier, on voit que l'accroissement de la résistance due à la finesse de broyage augmente considérablement.

Dans le cas où un ciment donne un fort accroissement de résistance pour une finesse à 20 % de refus, entre des périodes de 7 et 28 jours, on constate non seulement une diminution de résistance de la pâte pure à mesure que sa finesse augmente, mais encore un accroissement moindre de résistance entre ces deux mêmes périodes. Nous en voyons un exemple un peu plus loin. On a pris une certaine quantité de ciment sortant des broyeurs et on l'a divisée en deux parties dont l'une fut essayée telle quelle et dont l'autre fut broyée de façon à passer entièrement au tamis n° 200, et essayée à son tour.

Voici les résultats obtenus :

En pâte pure

	1 jour	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans
Après broyage supplémentaire	327	630	725	730	760	825	850
A la sortie des broyeurs.	210	525	540	540	560	575	660

En Mortier 1 : 3

	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans
A la sortie des broyeurs.	278	357	387	390	410	425
Après broyage supplémentaire	480	555	575	615	623	640

Dans une expérience faite par Meade avec un petit broyeur dans le but de déterminer le temps nécessaire pour arriver aux finesses voulues, on a obtenu les résultats suivants :

Finesse d'après le refus au tamis 200	Heures de broyage nécessaires pour arriver à ces finesses
25	19 heures
30	21 »
15	23 heures 1/4
10	26 »

D'après cela l'accroissement de la finesse pour passer du refus de 25 % à un refus de 10 % au tamis 200 donne lieu à une augmentation de 37 % dans le prix du broyage. Or, le prix du broyage est de 15 à 20 % du prix total d'un baril de ciment.

Donc l'accroissement de finesse précédent produirait une augmentation de 5,5 à 7,4 % du prix de fabrication et ce taux viendrait encore en diminution du prix du ciment livré au chantier.

En nous reportant au tableau précédent, nous voyons que le ciment laissant un résidu de 10 % au tamis 200 donne au mortier 1 : 4 une résistance à peu près égale à celle du mortier 1 : 3 fait avec le ciment laissant un résidu de 20 %.

Donc il suffit d'employer 75 % seulement du ciment le plus fin pour obtenir la même résistance. On réduit donc la quantité de ciment de 25 % alors qu'on n'élève son prix que de 6 %.

Supposons que le prix de 100 kg. de ciment soit de 4 francs (1). L'augmentation due à l'accroissement de la finesse sera de 0 fr. 25, soit 4 fr. 25 les 100 kg. Or à 100 kg. de ciment ordinaire ne correspondent que 75 kg. de ciment plus finement broyé. Dans ce dernier cas la dépense pour la production d'une même quantité de mortier de même résistance sera de 3 fr. 20.

Il y a donc là un argument décisif en faveur du ciment finement broyé.

EMPLOI DU BROYEUR-SÉLECTEUR POUR LA MOUTURE DU CIMENT

Pour compléter les renseignements qui précèdent, il nous paraît intéressant de rapporter ici quelques-uns des résultats fournis par les ciments obtenus à l'aide du broyeur Pfeiffer combiné avec le sélecteur. Parmi les nombreux essais effectués avec ces ciments, nous nous bornerons à ceux produits dans les trois types de fours généralement employés (fours verticaux, fours Hoffmann et fours rotatifs) (2).

---

(1) Prix d'avant la guerre, bien entendu.

(2) D'après un rapport présenté par le Dr Dreyer à l'assemblée des fabricants allemands de ciment Portland, à Berlin le 13 février 1910.

a) Ciments de four Hoffmann. — Clinkers bien cuits, broyés dans les moulins à boulets système Pfeiffer (garnis de 5.000 kg. de boulets). L'emploi du *Séparateur* a donné la finesse normale caractérisée par un refus de 18 % sur le tamis de 5.000 mailles et de 1,3 sur celui de 900 mailles. La production a atteint 5.900 kg. par heure.

Le même broyeur avec la même charge de boulets, et combiné avec le *Sélecteur* pour effectuer la mouture fine, a produit 5.100 kg à l'heure. En réduisant le refus de 18 % à 1 % sur le tamis de 5.000 mailles, et à zéro sur le tamis de 900 mailles, la production n'a diminué que de 15 3/4 %, tandis que les résistances se sont accrues comme suit pour un mortier composé de 1 partie de ciment pour 3 parties de sable normal, après 28 jours de durcissement sous l'eau :

Résistance à la traction :

Ciment normal	24 kg./cm²
Ciment fin	32,5 »

Résistance à la pression :

Ciment normal	232 »
Ciment fin	374 »

D'après les observations recueillies dans les fabriques où cette mouture a été faite, le prix de revient (comprenant les frais de fabrication) a augmenté de 2 centimes par baril de 170 kg. depuis l'installation des sélecteurs, alors que la résistance à la traction s'est accrue de 8,5 kg. = 35 % et la résistance à la compression de 142 kg. = 61 %.

b) Ciments de fours verticaux.

Les mêmes clinkers, obtenus au four vertical et réduits en farine normale, donnant un refus de 19,8 % sur le tamis de 5.000 mailles et en farine plus fine ne donnant que 2 % de refus sur le même tamis, ont donné les résistances suivantes :

1° *Mortiers composés de 1 partie de ciment pour 3 parties de sable normal :*

Résistance à la compression après 28 jours de durcissement mixte (7 jours sous l'eau, 21 jours à l'air).

Ciment normal	269 kg.
Ciment fin	343 »

2° *Mortiers maigres composés de :*

0,8 parties de ciment fin et 3 parties sable normal.......				266 kg.
0,85	»	»	»	279 »

3° *Cubes de béton.*

Dosage : 1 partie ciment, 3 parties sable normal, 6 parties de graviers.

Résistance à la compression au bout de 28 jours de durcissement mixte :

Ciment normal..	136 kg.
Ciment fin...	196 »
Augmentation........................	44 %

4° *Dosage maigre.*

0,85 partie ciment fin, 3 parties de sable, 6 parties graviers = 148 kg.

Un dosage très maigre suffit donc, quand on emploie du ciment fin, pour obtenir la même résistance qu'avec la finesse normale employée à un dosage riche.

c) *Ciments de fours rotatifs.*

Les clinkers des mêmes ciments, obtenus au four rotatif et broyés à la finesse normale à l'aide de tubes broyeurs et en fine farine à l'aide du broyeur sélecteur Pfeiffer, ont donné les résistances suivantes : Mortiers au dosage de 1 partie ciment et 3 parties sable normal. Résistance à la compression (au bout de 7 jours de durcissement sous l'eau et 21 jours à l'air humide) :

Ciment normal, tube broyeur.........................	295 kg.
Ciment fin. Broyeur-sélecteur.......................	426 »

Par suite, le sélecteur a permis d'obtenir une augmentation de résistance de 135 kg.

Nous pourrions citer une longue série d'essais analogues dont les résultats se traduisent tous par une forte production horaire et une augmentation considérable de la résistance (jusqu'à 60 %).

Le grand avantage du système de mouture de Pfeiffer frères consiste dans la réunion du broyage préparatoire et de la mouture fine dans un seul et même appareil, d'où résulte une économie de force motrice et d'installation par suite de la suppression du tube broyeur, et la possibilité d'obtenir sans la moindre difficulté toutes les finesses désirées.

SILOTAGE ET ENSACHAGE DU CIMENT

En règle générale le ciment broyé est conservé en silos sur lesquels on prélève au fur et à mesure des expéditions. Ces silos seront assez grands afin qu'on ne soit pas pris au dépourvu au cas où le broyage du clinker viendrait à être arrêté pour une cause imprévue. En outre, quand on dispose de magasins assez vastes, on ne s'expose pas à la nécessité d'arrêter la marche de l'usine dans les moments d'accalmie et, par suite, de congédier son personnel. Enfin, comme nous l'avons déjà fait observer en parlant du clinker, la conservation du ciment influe sur son invariabilité de volume.

On s'inspirera de toutes ces considérations pour donner aux magasins des dimensions convenables, sans cependant augmenter inutilement les frais de construction. Pour se conformer aux exigences de la pratique, on calcule les dimensions des magasins de telle sorte qu'ils puissent contenir la production de 30 journées de travail.

On distingue deux modes de conservation du ciment : *a*) dans des chambres, *b*) en silos. Nous aurons donc à examiner leur construction et le mode de travail pour les deux catégories.

Magasin à chambres. — Le magasin à chambres est très peu élevé, mais étendu en surface ; sa hauteur ne doit pas dépasser 6 m. Il est divisé en une série de compartiments de 5 à 10 m. de large sur 15 à 25 m. de long. Les parois extérieures et celles des compartiments doivent être en bois rond ayant environ 13 cm. de diamètre, serrés les uns contre les autres, encastrés par leur extrémité inférieure dans une couche de béton et réunis au sommet par des brides. Les parois des compartiments doivent être reliées ensemble par des ancres assez résistantes pour leur permettre de supporter la poussée latérale de la masse de ciment et de les empêcher de transmettre cette poussée aux parois de clôture du bâtiment.

On laisse d'un côté ou même des deux sur toute la longueur du magasin un espace d'au moins 5 m. de large pour l'emballage du ciment ; on réserve dans chaque chambre pour l''entrée des véhicules une ouverture d'environ 1 m. 50 de large sur 2 m. 50 de haut qu'on ferme avec des planches au fur et à mesure du rem-

plissage. En vidant la chambre on retire les planches dans l'ordre contraire.

Les frais de construction du magasin à compartimentss sont relativement peu élevés, surtout dans les contrées où le bois est bon marché. Par contre, la manutention des produits dans ces magasins revient assez cher; le remplissage s'effectue au moyen de transbordeurs mécaniques ou électriques, mais la vidange ne peut se faire que par l'ensachage ou l'embarillage du ciment à la pelle. En outre, ce mode de travail est coûteux et très gênant pour les ouvriers à cause du dégagement de poussière; malgré cela, on trouve encore de nombreuses fabriques de construction ancienne qui ne peuvent ou ne veulent pas se décider à consacrer économiquement un petit capital à la construction de silos.

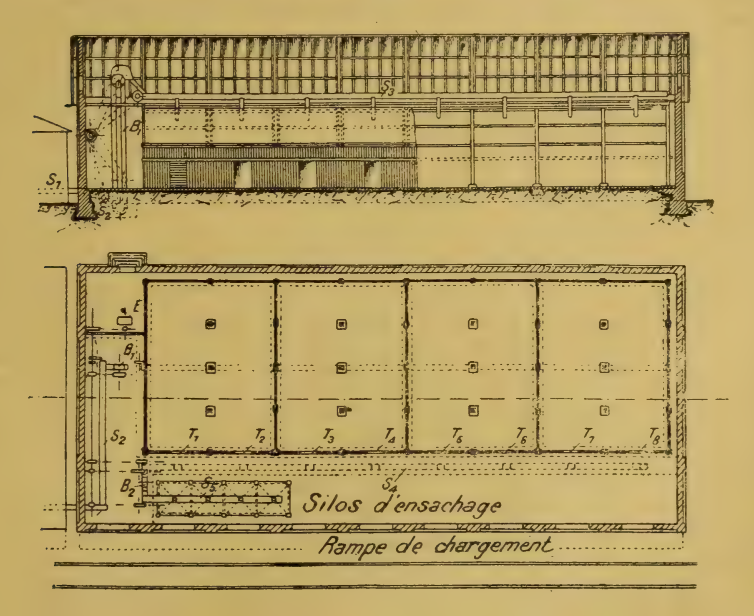


Fig. 108 et 109. — Magasin à compartiments pour la conservation du ciment. (Elévation et plan)

On a cherché à combiner les avantages des magasins à silos avec ceux du magasin à compartiments; c'est ainsi que, dans certains cas, on a installé le long des chambres une vis transporteuse amenant le ciment dans la cuvette d'un élévateur qui le déverse dans un ou deux silos dit d'emballage. Ceux-ci présentent tous

les avantages des silos, avec cette différence qu'on a moins d'espace pour l'emballage. Dans cette combinaison la vidange des chambres se fait aussi à la main, il est vrai, puisque le ciment est chargé à la pelle dans l'auge du transporteur, mais l'emballage se fait avec plus de facilité. La courroie ou la vis transporteuse qui amène le ciment du moulin broyeur doit pouvoir également remplir directement les silos d'emballage au moyen d'une ou de deux vis, de sorte que dans les moments de fortes expéditions on peut supprimer le remplissage des chambres.

En dernier lieu on a installé dans certaines usines les magasins à compartiments de manière à pouvoir en faire la vidange par des moyens mécaniques. Cette modification présente de réels avantages qui compensent largement les différences de frais d'installation.

Les figures 108, 109 et 110 (1) représentent un magasin à compartiment à quatre silos d'emballage. Il se compose de quatre chambres de 10 m. de large, 13 m. de long, 3,5 m. de hauteur latérale et 6 m. de hauteur moyenne. Les parois intermédiaires et

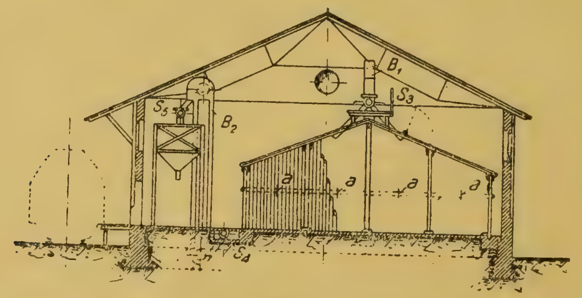


Fig. 110. — Magasin à compartiments (coupe transversale à échelle réduite)

les parois extérieures sont en bois rond de 13 cm., reliées par des ancres *a* et par des brides. Les chambres sont fermées par le haut au moyen de planches munies de regards à régistre. Les huit ouvertures de convoyage ont 2 m. de haut et 1,2 m. de large. Les chambres sont surmontées d'une plateforme sur laquelle est établie également la vis de remplissage s^3.

(1) Pour plus de clarté, on a représenté la fig. 110 à une échelle un peu plus grande.

L'espace réservé pour l'emballage, dans lequel se trouvent les quatre silos d'emballage sus-mentionnés, a une largeur de 5,4 m.; il se termine par la rampe de chargement, qui a 1,5 m. de large et une hauteur correspondante au profil normal des chemins de fer.

Les parois de clôture du bâtiment sont de construction massive, mais elles peuvent être au besoin de construction légère, puisqu'elles n'ont à supporter qu'une toiture légère. La paroi antérieure est percée de 9 baies de convoyage munies de portes à coulisse.

L'outillage mécanique se compose de la vis S^2 qui reçoit de la vis S^1 le ciment venant du broyeur et le déverse dans la cuvette de l'élévateur B^1; celui-ci le déverse dans la vis S^3 qui le répartit dans quatre chambres au moyen de 16 tuyaux de distribution; la vis S^4 sert à convoyer le ciment, qui y est chargé à l'aide de brouettes, dans la cuvette de l'élévateurB^2; celui-ci se décharge dans la vis S^5 qui remplit les quatre silos d'emballage, sous lesquels sont installés les dispositifs nécessaires à cet effet. Cette installation exige une force motrice d'environ 18 HP. Le magasin a une capacité de 2.500 m³.

Magasin à silos. — Le magasin à silos convient surtout dans les cas où l'on ne dispose que d'un emplacement restreint; sa capacité dépend donc essentiellement de la hauteur des silos, qui est en moyenne de 10 à 15 m. Ce système est beaucoup plus économique que le précédent, non seulement parce que les frais de construction sont moins élevés, mais encore parce que le travail d'emmagasinage et d'emballage peut se faire à l'aide de moyens mécaniques, ce qui est un avantage très appréciable.

Le magasin à silos se compose d'un certain nombre de compartiments de profil carré ou cylindrique installés sur un, deux ou même un plus grand nombre de rangs. On adoptera la forme cylindrique pour la construction en fer, la forme carrée pour la construction en bois ou en ciment. On leur donne généralement un diamètre ou une longueur ne dépassant pas 5 m., par suite de la difficulté que présente la vidange complète lorsque les cellules ont des dimensions plus grandes.

Etant donné l'énorme poids que représente un silo rempli, il faut apporter les plus grands soins à la construction du plancher qui le supporte. Ce dernier sera en béton de ciment de première

qualité, étayé par des piliers en fer, les piliers ordinaires en briques étant trop encombrants. Les murs de clôture, lorsqu'on les juge nécessaires, peuvent être en tôle ondulée, en ciment armé ou en bois. Les compartiments sont protégés au haut par une couverture qui les met à l'abri de la poussière, et le tout est abrité sous une ample toiture. La cage de l'escalier est généralement située à l'extérieur du bâtiment, mais appliquée contre lui.

Pour remplir les silos on se sert, comme pour le magasin à compartiments, de vis ou de courroies en ayant soin de munir les premières d'orifices de sortie munis de tiroirs en nombre correspondant à celui des silos, les seconds de chariots de déchargement.

La vidange des silos s'effectue le mieux à l'aide de vis transporteuses protégées contre la pression qui règne au-dessus d'elles par des grilles tournantes, ou encore à l'aide de vis doubles, etc. Nous avons décrit la construction et le mode de fonctionnement de ces dispositifs; nous n'y reviendrons pas ici.

Il n'est guère possible d'indiquer, même approximativement, les frais d'installation des magasins à silos; plus on augmente la hauteur des silos pour un même diamètre, plus diminue le coût total relatif de la construction. En effet, la surface du terrain, la toiture et l'infrastructure restent à peu près constantes, la toiture étant la même quelle que soit la hauteur ; seule l'infrastructure sera d'un coût un peu plus élevé par suite de son renforcement correspondant pour une hauteur plus grande des silos. Par conséquent, la différence de prix de revient des silos élevés provient presque exclusivement des parois; il s'ensuit que les silos les plus élevés sont ceux qui reviennent le moins cher. Comme nous l'avons vu plus haut, les silos de 20 à 22 m. de hauteur ne sont pas une rareté; on en trouve en Amérique qui ont 30 m. de haut et même plus.

Comme exemple de construction de silos en béton armé, citons ceux de la fabrique de ciment d'Oppeln en Silésie (1). Cette construction se compose de douze réservoirs verticaux à section carrée de 4 m. × 4 m. Ils contiennent environ 1.750 m³ de ciment Portland. Le ciment est amené aux silos par une vis transporteuse à travers un canal souterrain. A l'une des extrémités du bâtiment se trouve une cage d'escalier qui sert également de puits

(1) *Rev. des matér. de construction*, juin 1909.

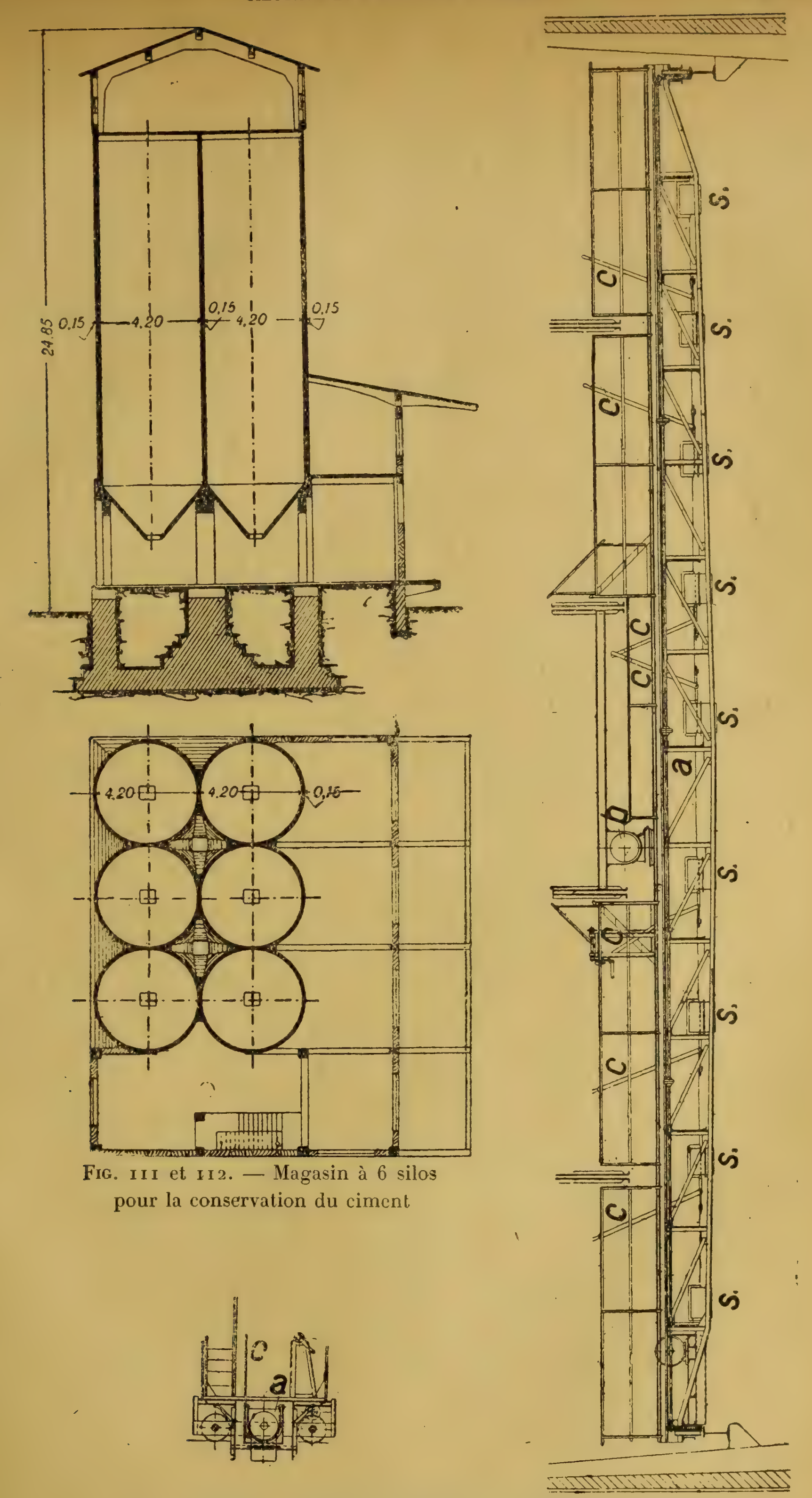


FIG. 111 et 112. — Magasin à 6 silos pour la conservation du ciment

FIG. 113 et 114. — Vis amovible pour le remplissage des silos

d'extraction. Le ciment est élevé au moyen d'un élévateur à godets, et à l'étage supérieur il est conduit aux silos à l'aide d'une vis transporteuse. A l'extrémité inférieure se trouvent des balances automatiques pour le pesage des sacs. Dix réservoirs sont ainsi munis de ces balances, tandis que les autres servent au remplissage des barils. Sur l'un des grands côtés se trouve une rampe de chargement dont le sol a une inclinaison de 20 cm. destinée à faciliter le transport des sacs dans les wagons de chemin de fer qui se trouvent devant la rampe. Entre le silo et la rampe se trouve une salle d'emballage de 8 m. 90 de large, couverte d'un toit en béton armé.

Le silo entier repose sur une assise en béton armé de 70 cm. d'épaisseur. Pour le protéger contre l'humidité de l'extérieur on a recouvert la paroi d'une seconde paroi en béton armé de 7 cm. d'épaisseur; entre ces deux parois se trouve une couche d'air de 8 cm. qui sert comme isolateur de la chaleur.

Les parois extérieures du silo ont une armature d'un seul côté, car la pression ne vient que de l'intérieur, tandis que les parois de l'intérieur doivent pouvoir résister à une pression des deux côtés dans le cas où une chambre vide se trouve à côté d'une chambre pleine.

Les figures 111 et 112 représentent un magasin à six silos en béton armé d'une contenance de 14.000 barils. Les explications qui précèdent nous dispensent d'en donner une plus ample description. Comme pour le magasin à chambres, le remplissage des silos se fait à l'aide de vis transporteuses dont on connaît le mode de fonctionnement.

Pour le remplissage des silos de grande capacité, on se sert parfois de vis amovibles. Les figures 113 et 114 nous montrent une installation de ce genre. *b* est la vis réceptrice amovible, munie de huit tronçons de distribution qui répartissent le ciment dans la vis *a*, également amovible, qui possède huit tronçons de distribution S^{1-9}. *c*, *c*... sont des tiges permettant de manœuvrer les régistres des tronçons S^{2-8}. Ce dispositif permet donc de déverser la matière sur $8 \times 9 = 72$ points différents du silo. Le tout est actionné par un moteur électrique.

La vidange des silos se fait le mieux à l'aide de vis doubles déjà mentionnées plus haut; celles-ci servent d'ailleurs également

pour les prélèvements de poudre de charbon et des matières pulvérulentes destinées à alimenter le four rotatif.

Appareil de vidange automatique des silos. — L'organe essentiel de cet appareil est une chaîne de construction spéciale entraînant la matière hors du silo. Cet appareil peut servir à la vidange des silos à fond plat aussi bien que de ceux à fond incliné.

Sa construction tout à fait particulière permet d'éviter les engorgements si fréquents avec les appareils employés habituellement. Son peu d'entretien et sa faible usure le placent au premier rang des appareils de ce genre.

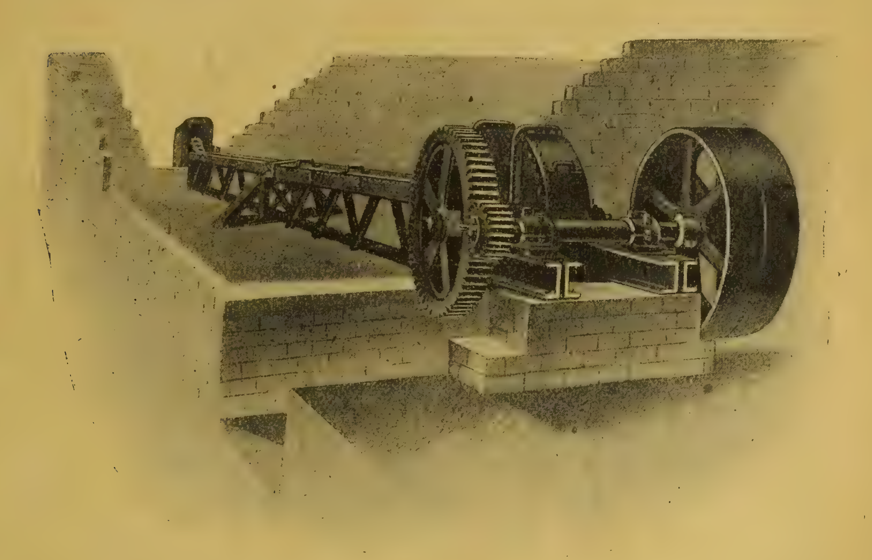
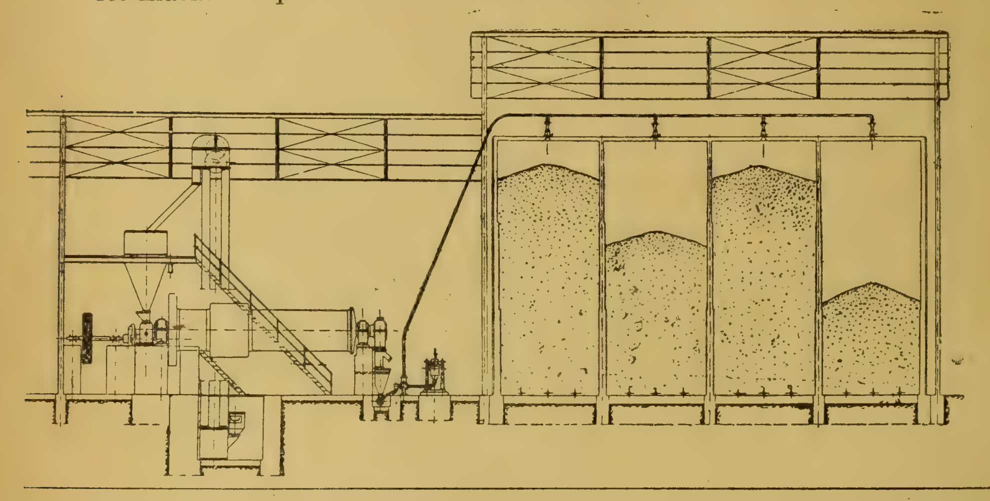


Fig. 115. — Appareil de vidange automatique des silos (Ateliers d'Arlod)

Enfin, le remplissage et la vidange des silos (de ciment et de poudre brute) s'effectuent également par le système pneumatique. Les figures 116 et 117 représentent une installation de ce genre. Le procédé est identiquement le même que celui décrit plus haut pour le transport de la boue; nous ne nous y arrêterons donc pas. Contentons-nous de faire remarquer que pour le transport des matières pulvérulentes on n'a pas besoin d'air comprimé en excès, ce qui permet de supprimer les dispositifs de séparation de l'air qui sert de véhicule.

ENSACHAGE ET EMBARILLAGE DU CIMENT

L'ensachage et l'embarillage du ciment se faisaient autrefois et se font souvent encore aujourd'hui à la main. On a cherché tout naturellement à faire ce travail mécaniquement afin de supprimer autant que possible la main-d'œuvre. Nous allons décrire les machines qui ont été construites dans ce but.



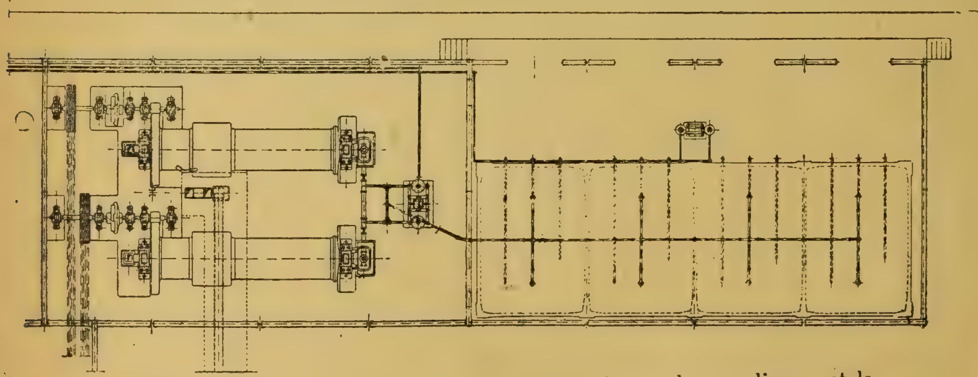


Fig. 116 et 117. — Emploi de l'air comprimé pour le remplissage et la vidange des silos

La figure 118 représente un embarilleur, tel qu'on le dispose généralement dans les fabriques de ciment.

Un plateau en fonte, destiné à porter le baril, est adapté à l'extrémité libre d'un madrier en chêne, solidement fixé à son autre extrémité et recevant un mouvement élastique d'un appareil ta-

poteur. Celui-ci se compose de deux roues percutantes superposées, en fonte durcie. Le support supérieur est fixé sous le madrier, le support inférieur sur un socle en maçonnerie. La commande se fait par courroie; à cet effet, l'arbre de la roue percutante inférieure est prolongé, muni de poulies fixe et folle et logé dans un palier spécial.

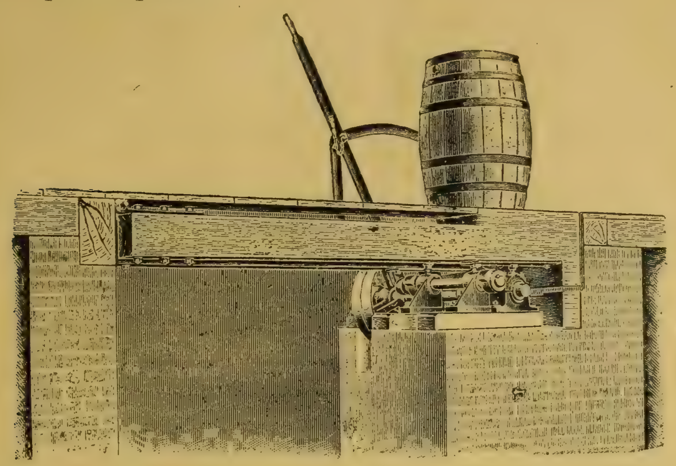


Fig. 118. — Embarilleur

Grâce au mouvement saccadé, sans cesse imprimé au plateau par le madrier, la matière chargée dans le baril est uniformément tassée en quelques minutes.

Pour le remplissage simultané de plusieurs barils, on installe généralement un nombre correspondant d'embarilleurs disposés en batterie, avec arbre de commande commun. Chaque embarilleur est muni, dans ce cas, d'un levier de manœuvre pour embrayer ou débrayer l'appareil percuteur.

La force motrice nécessaire est de 0,4 à 0,7 cheval pour 15 à 20 barils de ciment à remplir par heure.

Pour éviter autant que possible les ébranlements résultant de l'action de ces machines et ménager les tonneaux, on installe parfois la table supportant les tonneaux pour le remplissage sur quatre ressorts solides en spirale. En outre, comme le tapotage porte exactement contre le milieu de la table, celle-ci conserve son parallélisme et le ciment se répartit uniformément dans les barils.

Dans les grandes usines on se sert d'une balance double pour le remplissage et le pesage automatique des sacs ; cette

machine a reçu un certain nombre d'applications. Elle est fixée sous l'ouverture de sortie d'un silo; cependant il vaut mieux y amener le ciment à l'aide d'une hélice. La manœuvre du clapet placé dans les tuyaux d'arrivée du ciment dans les sacs s'effectue d'une manière automatique. Un compteur enregistre le nombre de sacs pesés. L'ensachage se fait sans dégagement de poussière, celle-ci étant aspirée par un ventilateur dans les tuyaux qui la conduisent dans un collecteur de poussière. On installe la balance à un niveau suffisamment élevé pour qu'on puisse enlever facilement les sacs pleins sur un chariot.

Une balance automatique de ce système permet de remplir et de peser à l'heure 800 sacs à (57 kg).

Dans les cas où, eu égard à la faible capacité des compartiments du silo, il serait impossible d'installer à demeure une machine automatique à entonner ou à ensacher, on emploie des appareils montés sur chariot.

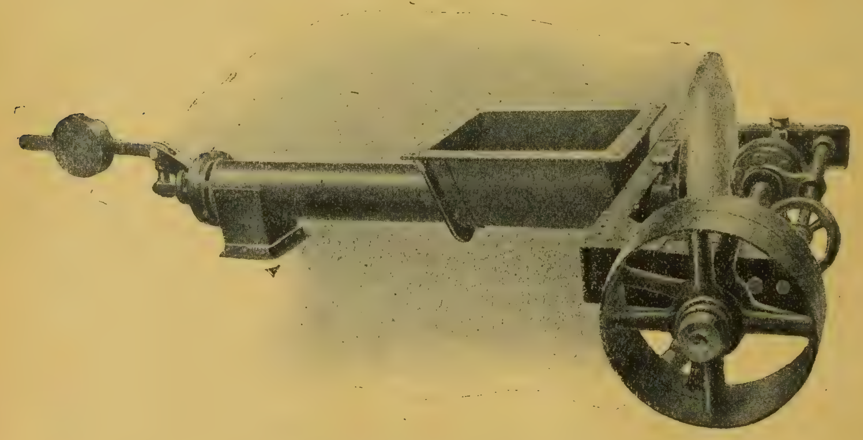


Fig. 119. — Appareil d'ensachage automatique construit par les Ateliers d'Arlod

La vidange des trémies d'ensachage se fait automatiquement au moyen d'un appareil spécial (fig. 119). Il se compose d'une vis de petit diamètre tournant dans un tube et dont la vitesse, par conséquent le débit, peut être réglée à volonté à l'aide d'un volant de réglage. La matière tombant des silos est déplacée par cette vis et amenée aux balances ensacheuses. Le débit aussi régulier que précis de ces vis facilite considérablement le travail des balances.

Les figures 120 et 121 montrent l'installation d'une balance double. La balance *a* est montée sur un chariot *b* roulant sur rails qui courent le long du silo. Le ciment est amené dans la balance par une hélice *c* actionnée par le moteur *f*. La poussière qui se dégage dans les opérations est aspirée par les tuyaux *d* d^1 et conduite au collecteur de poussière par l'hélice *e*. Le rendement de cette installation est de 240 sacs par heure.

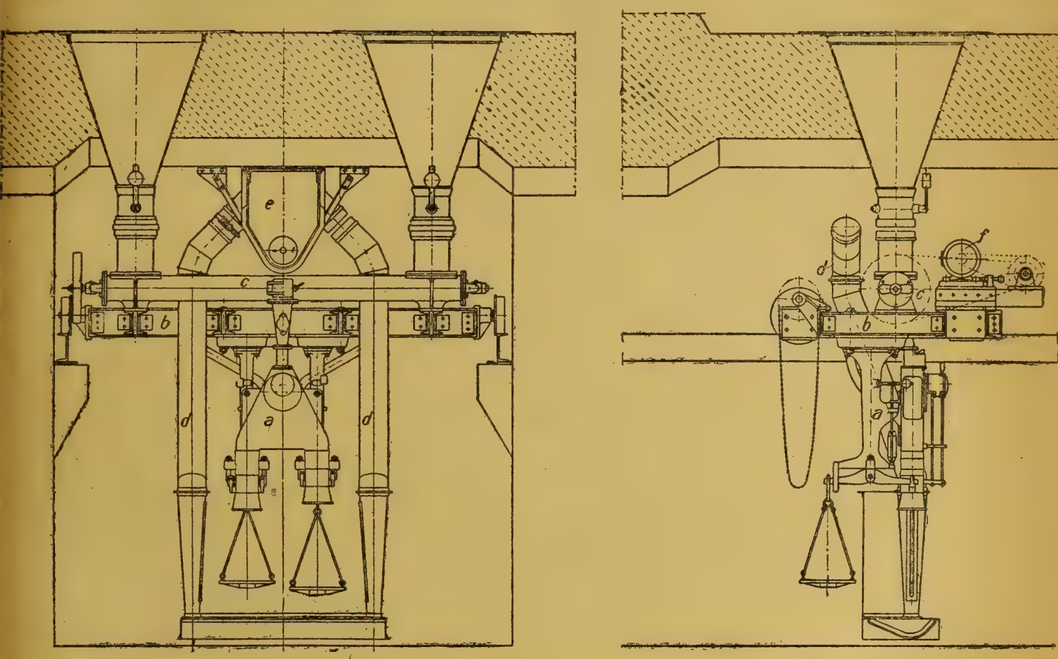


Fig. 120 et 121. — Balance automatique double

L'usage de loger le ciment dans des sacs qui était peu répandu autrefois, et le remploi des sacs pour les expéditions jusqu'à ce qu'ils soient usés, ont amené les fabricants à installer des machines pour les nettoyer.

Les fabricants de ciment allemands se sont organisés pour réglementer la question de reprise et le raccommodage des sacs vides qui ont servi pour les livraisons.

CHAPITRE VIII

CIMENT DE LAITIER ET CIMENT PORTLAND DE FER

APERÇU HISTORIQUE (1)

Parmi les résidus des diverses industries, les laitiers de haut fourneau sont certainement les plus encombrants : leur amoncellement exige des surfaces sans cesse croissantes de terrain à prix élevés, des tranports coûteux à des distances et à des hauteurs de plus en plus considérables. On peut se faire une idée de l'importance de ce produit accessoire de la fabrication de la fonte, laquelle, en 1898 et pour le monde entier, a dépassé 36 millions de tonnes, si l'on considère que pour une tonne de fonte on obtient une à deux tonnes de laitier.

Aussi a-t-on cherché depuis longtemps, dans tous les pays producteurs de fonte, à utiliser les laitiers, principalement dans le but de s'en débarrasser. Les laitiers ont d'abord été cassés et employés à l'empierrement des chemins voisins des forges ; ils ont été reçus à la coulée dans des moules de forme diverses, en vue de les employer dans la construction ; on en a utilisé, en gros blocs, principalement en Angleterre, pour des enrochements et des digues à la mer et dans les cours d'eau. Puis on a essayé d'en faire des briques, des tuiles, des pavés. On a aussi fait des tentatives pour fabriquer des bouteilles et des vases avec des laitiers additionnés de fondants.

Au commencement du 19e siècle, Vicat avait entrevu les propriétés pouzzolaniques de certains laitiers. Mais, l'utilisation de

(1) Cf. A Brüll et H. Henry, ingénieurs. Communication présentée devant le Congrès international des Méthodes d'essai des matériaux de construction. Paris, 1909.

ces derniers n'a pris une réelle importance que lorsqu'ils ont été obtenus, non plus sous une forme compacte, mais bien à l'état de sable granulé. C'est la granulation des laitiers par leur projection dans l'eau froide au sortir du haut fourneau qui a permis d'utiliser en grand le sable obtenu. Le grenaillage paraît dû à Langen qui, en 1861, l'a pratiqué aux hauts fourneaux de la Friedrich Wilhelm's Hütte près Troisdorf sur le Rhin.

Quelque temps après, Lürmann a facilité beaucoup le grenaillage en inventant la tuyère pour l'écoulement continu des laitiers. Il reconnut aussi l'influence qu'exerce le grenaillage sur le développement des propriétés pouzzolaniques des laitiers.

Cette division des laitiers dans l'eau n'avait tout d'abord d'autre but que de faciliter leur enlèvement. Mais, dès 1862, à Osnabrück, l'application du laitier granulé à la fabricaton d'un ciment était essayée dans l'usine Lürmann, où l'on produisait des agglomérés.

C'est surtout à la production de briques et de pierres moulées que le laitier en sable a été tout d'abord employé en mélange avec de la chaux. De grandes quantités de briques ont été produites dans divers pays, principalement en Angleterre, en Allemagne et en France. Actuellement, cette fabrication, bien améliorée, s'est répandue dans le monde entier et constitue une industrie assez importante.

FABRICATION DU CIMENT DE LAITIER

Parmi les applications des propriétés pouzzolaniques des laitiers convenablement choisis, après granulation, celle qui a le mieux réussi depuis une vingtaine d'années, est la fabrication d'un ciment par mélange à froid avec de la chaux. C'est vers 1880 que cette fabrication a été entreprise sur un pied vraiment industriel, à la forge de Choindez, près de Delemont, dans le canton de Berne, en Suisse. Cette usine livre ses produits aux régions voisines, où les applications du ciment de laitier ont pris un assez grand développement. Vers la même époque, quelques fabricants de ciment Portland ont utilisé les propriétés des laitiers granulés en les mélangeant, après mouture, à leurs produits.

Pour la fabrication du ciment de laitier on ne doit employer que des scories basiques, qui pratiquement ne peuvent être obtenues qu'en marche chaude du haut-fourneau. Par scories basi-

ques on entend celles qui, pour 1 partie pondérale de silice soluble et d'alumine, contiennent 1 partie pondérale de bases, chaux et magnésie. Cependant, on rencontre aussi des scories à teneur très élevée en alumine qui fournissent néanmoins d'excellents ciments, quoique leur teneur en base soit un peu plus faible que la limite que nous venons d'indiquer. Le coefficient de basicité c'est-à-dire le quotient de $\frac{CaO}{SiO^2}$ doit être égal ou plus grand que l'unité. Ces scories ont un aspect jaunâtre, grisâtre ou bleuâtre; elles diffèrent par là des scories obtenues du haut-fourneau en marche plus froide, lesquelles, contenant du fer, ont une couleur foncée et sont absolument impropres à la fabrication du ciment ; elles sont d'ailleurs très difficiles à granuler. Les scories granulées ont l'aspect de gros sable à arêtes aiguës; elles présentent souvent des creux et retiennent encore jusqu'à 30 % d'eau quelque temps après leur granulation. A l'état sec, elles ont un poids spécifique de 2,7-2,9; à l'état granulé elles pèsent généralement 800 à 1.000 kg. par mètre cube non tassé; mais, lorsqu'elles sont extraites du four en marche très chaude ou qu'elles sont très chargées de silice, elles peuvent présenter une différence en moins allant jusqu'à 250 kg. par mètre cube.

Le laitier sort du haut-fourneau à l'état liquide, à une température de 1.200-1.485°; pour l'amener à l'état solide à environ 500°, on le fait couler dans de l'eau froide ou bien on le pulvérise dans un courant d'air et d'eau froide. Cette opération, si simple en apparence, a tout d'abord présenté de grandes difficultés; mais on a fini par trouver des machines et des dispositifs mécaniques qui permettent de l'exécuter aisément.

Le laitier obtenu par pulvérisation dans un courant d'air peut être mis en œuvre immédiatement, tandis que le laitier granulé dans l'eau doit d'abord être séché dans un tambour séchoir où l'eau est vaporisée à une température comprise entre 200 et 300°.

La composition chimique des scories basiques varie dans des limites assez étendues suivant la composition des minerais mis en œuvre; c'est là, selon toute apparence, une des causes pour lesquelles on a cherché à exclure le ciment de laitier du nombre des ciments pouvant être employés de confiance, bien que dans une fabrication consciencieuse et soignée on puisse resserrer les limites de la composition et obtenir des produits sensiblement uni-

formes en les soumettant à la cuisson au four, ainsi que cela se pratique en Allemagne.

Le tableau suivant nous montre la composition chimique des scories basiques de haut-fourneau de différents pays :

	France	Suisse	Allemagne	Angleterre	Autriche	
					Königshof	Witkowitz
Silice	30,50	26,88	30,72	31,65	26,78	27,02
Chaux	48,00	45,11	48,59	32,26	46,34	54,05
Alumine	19,50	24,12	16,40	25,30	18,97	12,85
Oxyde de fer	0,85	0,44	0,43	0,10	1,40	1,42
Magnésie	0,75	1,09	1,28	3,54	3,17	3,04
Sulfate de chaux	—	1,86	2,16	1,42	3,06	1,47
Oxyde de manganèse	0,40	0,50	traces	0,36	0,10	—
Autres éléments	—	—	0,42	5,37	0,18	0,15
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Les propriétés pouzzolaniques produites par la granulation, sont le résultat immédiat de l'état vitreux en lequel les scories sont ainsi transformées, comme l'a démontré M. Le Châtelier. Le passage de l'état cristallisé en l'état vitreux est accompagné d'une grande absorption de chaleur; celle-ci vient augmenter la somme d'énergie latente du produit, c'est-à-dire son pouvoir et sa propension à se combiner avec d'autres corps. D'où la distinction des scories *fortement réactives* et des scories *faiblement réactives*.

La réactivité d'un laitier facilite considérablement la fabrication d'un ciment correct.

La chaux nécessaire pour la fabrication du ciment de laitier doit être parfaitement éteinte et soigneusement blutée avant son mélange avec le laitier; on doit en éliminer les surcuits et les incuits. Les particules de chaux imparfaitement éteintes entraîneraient le danger d'expansion et de formation de crevasses dans le ciment après son application. Toutes les chaux conviennent pour la fabrication du ciment : les chaux grasses augmentent sa solidité, mais lui donnent une tendance à se crevasser fortement durant la prise lorsqu'il se trouve dans un milieu insuffisamment humide; l'addition de chaux hydraulique donne un mélange de très bonne qualité qui ne se crevasse pas durant la prise.

Voici, comme exemple, l'analyse de quelques chaux servant à la fabrication de ciments de laitier :

Silice	9,25	15,00	21,75
Oxyde de fer et alumine	4,62	7,50	10,30
Chaux	84,65	60,00	63,95
Magnésie	1,40	1,08	0,85
Perte au feu et éléments non dosés.	0,08	16,42	3,15
	100,00	100,00	100,00

Le ciment de laitier ainsi obtenu a un poids spécifique beaucoup plus faible que le ciment Portland; en outre, la solidité et la résistance des maçonneries et des bétons qui en sont formés sont beaucoup moindres, car la chaux ajoutée ne forme que pour une faible part un silicate hydraté avec la silice du laitier, la majeure partie se carbonatant simplement à l'air. Enfin, les frais de fabrication sont assez élevés, car la cuisson et l'extinction de la chaux, la granulation à l'eau et le séchage du laitier, etc., exigent presque autant de travail que la fabrication du ciment Portland.

En résumé, la fabrication du ciment de laitier proprement dit (car on en fabrique encore deux autres, comme nous le verrons plus loin) est très simple et se réduit aux opérations suivantes :

Pulvérisation du laitier ; séchage du laitier ; mélange du laitier moulu (70 %) avec l'hydrate de chaux réduit en poudre fine (30 %).

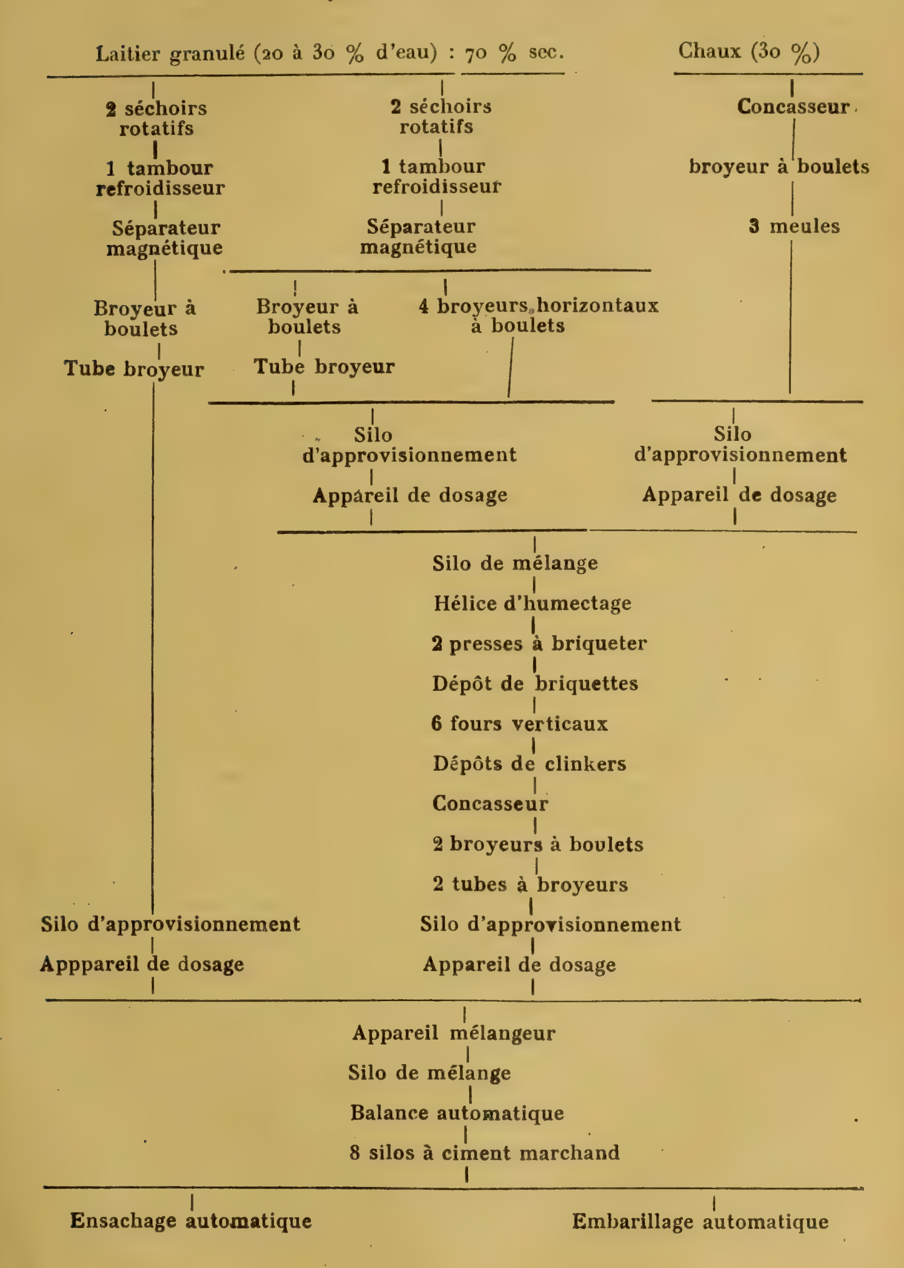
Le schéma de la page 273 nous montre la suite des opérations.

A l'usine de Choindez, la dessiccation du laitier est obtenue simplement et sans main-d'œuvre. On se sert d'une tour carrée en fonte munie intérieurement d'une série de plaques de tôle placées en chicane. Le four est traversé de bas en haut par les gaz d'un foyer et de haut en bas par le laitier.

Dans la fabrique de ciment de laitier de la Western Counties Cement and Slag-Making Compagny de Barrow in Furness, le séchoir à laitier est un cylindre rotatif de 12 m. de long, tournant lentement et maintenant le laitier en mouvement. Ce dernier est porté à une très haute température et la chaleur nécessaire à la dessiccation est fournie par un foyer situé sous le cylindre. Les gaz chauds sont aspirés à travers le laitier contenu dans le cylindre par un ventilateur tournant à une grande vitesse. Ce séchoir permet de dessécher 5 tonnes de laitier à l'heure.

Dans ces derniers temps on a inventé ou préconisé un grand

Schéma de fabrication du ciment de laitier



nombre d'appareils de ce genre dont la description nous entraînerait trop loin.

Le schema ci-dessus (1) représente la marche de la fabrication de l'usine Buderus, à Wetzlar, qui peut traiter en 24 heures 180 tonnes de laitier granulé.

La consommation de force est de 600 chevaux, et presque toutes les opérations s'effectuent mécaniquement, ce qui assure au produit une grande régularité.

Faisons remarquer, pour en terminer avec le ciment de laitier proprement dit, que ce produit ne jouit plus de la même faveur qui l'avait accueilli au début. On apprécie davantage le *ciment Portland de fer* et le *ciment de laitier Portland* dit *de haut fourneau*, que nous allons décrire.

CIMENT PORTLAND DE FER ET CIMENT DE LAITIER PORTLAND

Depuis une vingtaine d'années l'industrie du ciment de laitier a été l'objet de perfectionnements tels que ses produits n'ont plus rien de commun avec les anciens ciments que nous venons de décrire. On fabrique actuellement deux autres sortes de ciments de laitier. Le premier de ces produits est le *ciment Portland de fer* qui, après de nombreuses expériences, a été reconnu l'égal du Portland ordinaire et admis au même titre dans les adjudications de l'Etat prussien (Décision ministérielle prussienne du 6 mars 1909). Le ciment Portland de fer se compose de 70 % de clinkers obtenus par la cuisson jusqu'à scorification d'un mélange de laitier et de pierre calcaire et de 30 % de scories basiques granulées, les deux composants étant finement broyés ensemble. Dans ce ciment donc, le principal facteur du durcissement est le clinker de ciment Portland, dont l'action est soutenue d'une manière très énergique par les scories basiques.

Dans le second ciment de laitier, qui est *le ciment de laitier Portland* (appelé ciment de haut-fourneau en Allemagne), on suit une méthode inverse : les scories forment ici le principal facteur du durcissement, et le ciment Portland qu'on y ajoute, quoiqu'il soit indispensable, n'y joue qu'un rôle secondaire. On n'ajoute au laitier que la quantité de clinker de Portland nécessaire pour obtenir un produit de valeur égale à celle du Portland; cette quantité varie entre 15 et 30 % suivant la composition du laitier.

(1) *Stahl u. Eisen*, 23e année, p. 36.

On soumet le tout au broyage fin; le mélange des deux matières s'effectue de lui-même dans cette opération. On ajoute le plus souvent aussi un peu de gypse pour régler le temps de prise du ciment et pour augmenter sa résistance. Mais, tandis que le gypse a pour effet de ralentir la prise du ciment Portland, il produit l'effet contraire sur le ciment de laitier Portland, dont il accélère la prise.

La proportion du mélange de laitier et de ciment Portland est réglée dans chaque usine d'après les résultats d'analyse du laitier. L'addition d'une forte proportion de ciment Portland n'a pas précisément pour effet d'améliorer le ciment de laitier Portland, elle produit même souvent l'effet opposé en diminuant les résistances. Pour comprendre ce phénomène en apparence paradoxal, il faut se rappeler que le rôle du ciment Portland ajouté consiste essentiellement à fournir au ciment de laitier Portland le calcaire dont il a besoin pour son durcissement à l'application.

Nous allons donner quelques détails sur la fabrication de ces deux sortes de ciments et faire ressortir en même temps l'importance de l'examen microscopique du laitier (1).

Pour le ciment *Portland de fer*, avons-nous dit, on emploie 70 % de clinker obtenu par la cuisson jusqu'à la scorification de pierre calcaire et de scories de haut-fourneau. La forme sous laquelle se trouvent ces scories importe peu au point de vue de la qualité du ciment. Seule leur composition chimique a de l'importance, car c'est d'elle que dépend la quantité de calcaire à y ajouter. On peut donc employer à cet effet avec un égal succès des scories non granulées, des scories granulées dans l'eau ou à l'aide de la vapeur. Il y a lieu de se rappeler cependant que les scories granulées dans l'eau sont plus faciles à broyer que les scories en grumeaux et les scories riches en silice granulées à l'air ou à la vapeur. On a cru remarquer, en outre, que les scories en grumeaux, qui sont des corps cristallins, exigent plus de combustible à la cuisson que les scories granulées. Comme la composition chimique des scories seule a de l'importance dans cette méthode de fabrication du Portland de fer, leur examen microscopique ne présente qu'un intérêt secondaire. L'essentiel pour obtenir un bon ciment de laitier de l'une et de l'autre catégories, est

(1) D'après un rapport présenté par le Dr Passow au Congrès international de Dusseldorf, 1910, *Tonindustrie Ztg*, 1910, p. 1174.

de produire des clinkers de bonne qualité, ne donnant pas lieu à l'expansion; il faut, par conséquent, mélanger les matières premières d'une manière judicieuse et bien soigner la cuisson.

Mais l'examen microscopique rend de grands services dans le choix des scories qu'on ajoute au clinker pour le broyage, et il devient indispensable pour la fabrication des ciments dans lesquels prédominent les scories. Autrefois on comprenait sous la dénomination collective de scories de haut-fourneau des matières de composition sensiblement constante dont l'addition au ciment produisait toujours les mêmes effets. L'invention de la granulation dans l'eau montra que le refroidissement rapide avait pour effet d'augmenter considérablement leur hydraulicité. Dans la suite, on remarqua en outre que la granulation donnait lieu à la formation de différents produits, et fournissait des grains de calibre variable suivant la composition chimique des scories, suivant la température des scories incandescentes et d'autres circonstances encore, d'où l'on conclut que pour obtenir de bons résultats il était nécessaire d'adopter une méthode de granulation conforme à la nature des scories.

A la suite de recherches microscopiques, le Dr Passow avait remarqué il y a quinze ans, que la granulation par n'importe quelle méthode donnait lieu à la formation de scories vitrifiées, de scories dévitrifiées et de produits intermédiaires. Cette découverte causa une grande surprise dans les milieux compétents : on commença par discuter la réalité de ces distinctions, puis on finit par reconnaître que l'auteur était dans le vrai, de sorte qu'aujourd'hui il n'est pas un fabricant compétent qui doute de la formation des scories vitrifiées et de leur influence respective sur la bonne qualité d'un ciment. Pour montrer cette influence, le Dr Passow cite comme exemple un lot de scories destinées à la fabrication du ciment et ayant la composition suivante :

SiO^2	32,36	%
Oxydes	12,35	»
CaO	45,96	»
MgO	4,34	»
CaS	5,51	»
$CaSO^4$	0,73	»

Examinées au microscope, ces scories donnèrent l'image d'une masse contenant des granules en partie de couleur foncée, en partie troubles et laiteux, dont les contours manquent de netteté :

c'est le type des scories dévitrifiées. Ces scories, additionnées de 1 % de chaux et soumises au broyage, fournirent un ciment de peu de valeur :

Résistance à la traction, 1 : 3 de sable normal

3 jours	7 jours	28 jours
3,2	3,7	4,5 kg. par cm²

Les mêmes scories furent soumises à la fusion dans un grand creuset et ensuite versées rapidement dans l'eau froide. On obtint ainsi des granules vitreux à contour très net. Ces scories, traitées comme celles ci-dessus et broyées à une finesse sensiblement égale, ont donné les résistances suivantes :

Résistance à la traction, 1 : 3 sable normal

3 jours	7 jours	28 jours
22,7	22,0	34,2 kg. par cm²

L'analyse des scories vitreuses après fusion, montre que leur composition chimique a été peu modifiée par la fusion :

SiO^2	33,25 %
Oxydes	12,47 »
CaO	45,54 »
MgO	4,23 »
CaS	4,91 »
$CaSO^4$	0,08 »

Un second exemple confirmera ce qui précède. Une scorie de haut-fourneau fortement dévitrifiée, contenant :

SiO^2	31,08 %
Oxydes	13,53 »
CaO	50,11 »
MgO	1,19 »
CaS	4,17 »
$CaSO^4$	0,48 »

fut additionnée de 10 % clinker de Portland, et broyée. Ce ciment donna les résistances suivantes :

Résistance à la traction, 1 : 3 sable normal

3 jours	7 jours	28 jours	
Eau	Eau	Eau	Position mixte
11,7	15,7	22,2	33,0

Résistance à la compression, 1 : 3

3 jours	7 jours	28 jours	
Eau	Eau	Eau	Position mixte
48	77	141	288

Cette scorie a pu être considérablement amélioré par la refonte et la transformation en l'état vitreux, comme le montrent les essais suivants :

Résistance à la traction, 1 : 3

3 jours	7 jours	28 jours	
Eau	Eau	Eau	Position mixte
18,5	24,2	30,3	31,5

Résistance à la pression

3 jours	7 jours	28 jours	
Eau	Eau	Eau	Position mixte
100	171	267	297

Ces exemples typiques montrent à l'évidence les grands services que peut rendre l'examen microscopique des scories destinées à la fabrication du ciment. Si l'on avait négligé cet examen pour les scories que nous venons de mentionner, on n'aurait pas songé à les modifier et on en aurait obtenu de mauvais résultats. On n'aurait pas reconnu qu'on pouvait améliorer ces scories par une granulation appropriée, par un refroidissement plus rapide, par la transformation des éléments dévitrifiés en éléments vitrifiés.

Faisons remarquer que les photographies ne rendent pas très exactement les produits tels qu'ils se montrent sous le microscope : il se produit souvent sur les bords des scories vitreuses ou dévitrifiées des phénomènes de polarisation qui renseignent sur la qualité des scories, mais qui, malheureusement, ne sont reproduits qu'imparfaitement par la photographie.

Quoi qu'il en soit, le microscope permet de reconnaître sûrement les défectuosités dans la granulation et aussi les défauts qui peuvent naître dans le séchage des scories granulées à l'eau. Ainsi, par exemple, lorsque les scories granulées à l'eau sont ensuite calcinées à une température trop élevée, elles se dévitrifient et fournissent un produit de qualité inférieure tout comme les scories mal granulées.

Le microscope est encore d'un grand secours dans l'examen des scories granulées par injection d'air : il permet de déterminer en quelques minutes les produits de la granulation et de voir si cette opération a été suffisante; en se basant sur les indications ainsi recueillies on pourra régler en conséquence le courant d'air ou de l'eau destiné à effectuer la granulation. Enfin l'emploi du microscope s'impose également dans les nouvelles installations de hauts-fourneaux.

Nous avons vu plus haut que les scories basiques de haut-fourneau peuvent être divisées en scories fortement réactives et en scories faiblement réactives, suivant leur composition chimique. Celle-ci varie dans les limites suivantes pour les scories des deux catégories :

	Scories fortement réactives	Scories faiblemeet réactives
SiO^2	27 à 31 %	33 à 37 %
Al^2O^3	13 à 20 »	9 à 12 »
CaO	50 à 45 »	51 à 40 »
CaS	8 à 4 »	4 à 2 »
MgO	8 à 2 »	3 à 1 »

La réactivité d'une scorie facilite considérablement la fabrication d'un ciment de bonne qualité. Ces sortes de scories n'exigent qu'une faible addition de clinker de Portland, donnent un ciment à grande résistance initiale et, détail important, elles n'exigent de loin pas un broyage aussi fin que les scories à faible réactivité. Par contre, elles présentent l'inconvénient de se vitrifier beaucoup plus difficilement que les scories peu réactives. Lorsque, après leur vitrification, elles présentent dans le noyau ou sur les bords vitrifiés des excrétions polarisantes, parfois sous forme d'aiguilles placées en éventail, celles-ci sont l'indice d'une teneur élevée en sulfures, et peuvent être considérées comme bonnes pour la qualité du ciment. Mais il en est tout autrement lorsqu'elles montrent sous le microscope des parties laiteuses ou même foncées. C'est là l'indice d'une dévitrification trop forte, provenant de ce que les scories projetées dans l'eau froide à l'état incandescent ont surnagé le liquide, se sont agglomérées et dévitrifiées lentement. On obvie à cette dévitrification à l'aide de moyens mécaniques qui permettent d'immerger immédiatement le flot incandescent des scories, de le diviser et d'empêcher ainsi la dévitrification.

Les mêmes précautions doivent être observées dans la granulation des scories réactives par éparpillement dans un courant d'air. Ici encore il faut adopter des dispositifs pour les soumettre à un refroidissement rapide dans toutes leurs parties dès leur sortie du haut-fourneau.

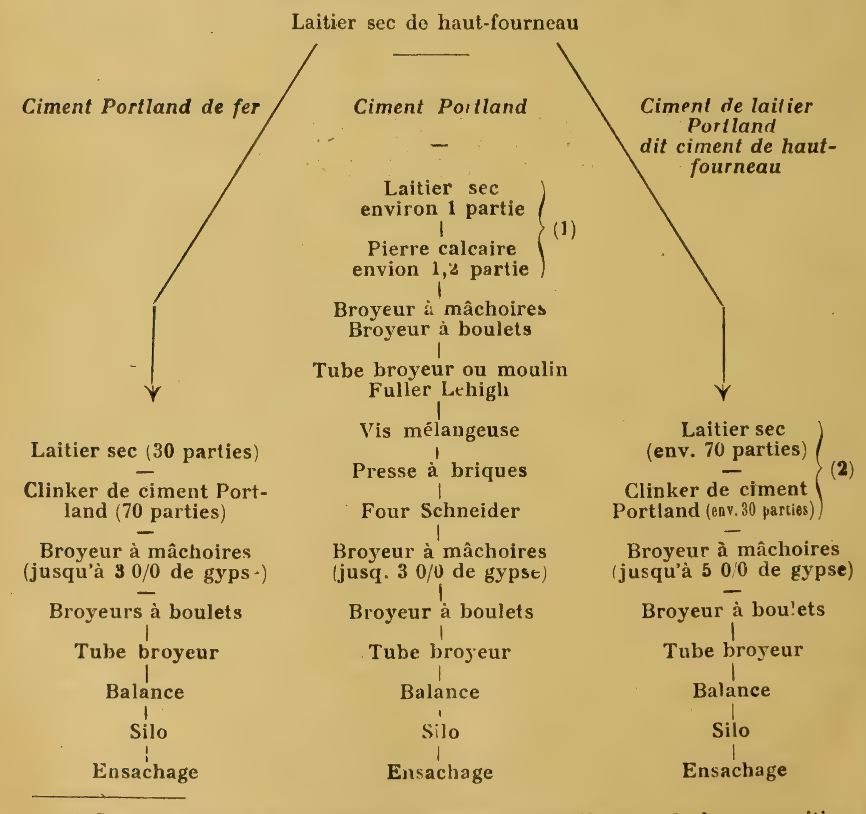
Les scories peu réactives peuvent être obtenues à l'état de verre pur à l'aide de moyens très simples ; mais elles exigent une addition de clinker beaucoup plus grande et une mouture beaucoup plus fine que les scories fortement réactives. Le mieux est

d'employer des scories occupant le milieu entre ces deux catégories et faciles à vitrifier.

Nous donnons dans les tableaux suivants des schémas de fabrication des trois sortes de ciment de laitier. Le tableau I montre la marche de la fabrication avec des fours continus de Schneider, des broyeurs à boulets et des tubes broyeurs ; le tableau II indique la marche avec four rotatif, broyage des matières à l'aide d'un tube broyeur compound qui peut à la rigueur suffire pour le broyage gros et fin.

TABLEAU I

Schema de fabrication de ciment dans lesquels entre du laitier

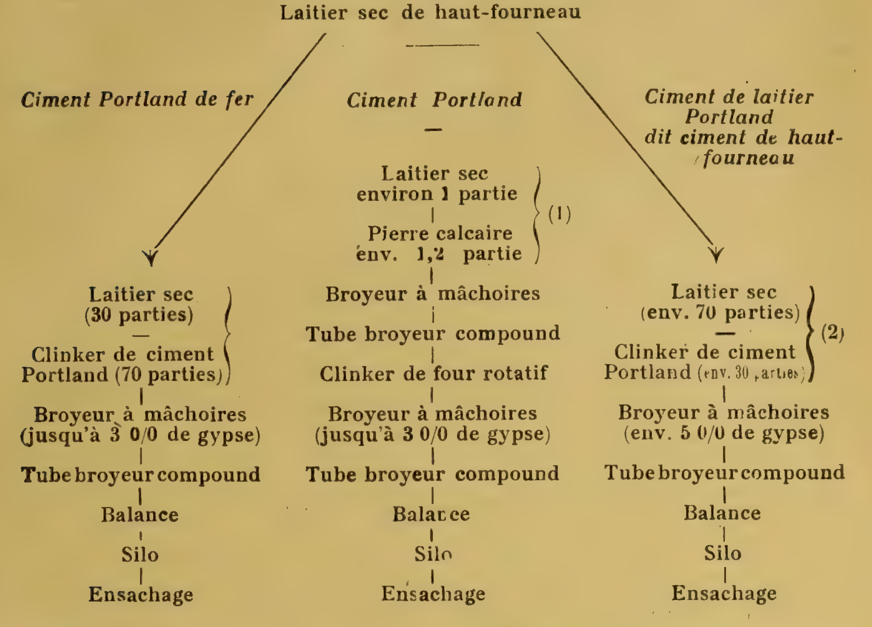


(1) Les proportions du mélange dépendent naturellement de la composition chimique du laitier et de la pierre calcaire, de sorte qu'il est impossible de donner des chiffres précis, valables pour tous les cas.

(2) Les proportions du mélange dépendent de la réactivité du laitier, de sorte qu'il est impossible de donner des chiffres précis, valables pour tous les cas.

TABLEAU II

Schema de Fabrication de ciments dans lesquels entre du laitier



L'examen de ces schemas montre que les frais de fabrication du ciment de laitier Portland sont excessivement modérés, puisqu'il n'y entre qu'une proportion relativement faible de clinker de ciment Portland exigeant un double broyage et la cuisson. Il est donc clair que le prix de revient de ce ciment est beaucoup moins élevé que pour le ciment Portland, à moins qu'on ne soit obligé d'acquérir le laitier à un prix exagéré ; la différence toutefois n'est pas aussi grande qu'on le croit généralement. La granulation du laitier pour ciment de laitier Portland doit être faite avec un soin tout particulier. Le laitier mal granulé pré-

(1) Les proportions du mélange dépendent naturellement de la composition chimique du laitier et de la pierre calcaire, de sorte qu'il est impossible de donner des chiffres précis, pour tous les cas.

(2) Les proportions du mélange dépendent de la réactivité du laitier, de sorte qu'il est impossible de donner des chiffres précis, valables pour tous les cas.

sente des inconvéniets beaucoup plus graves dans le ciment de laitier Portland que dans le ciment Portland de fer qui n'en contient que 30 %. En outre, pour développer toutes ses qualités, le ciment de laitier Portland doit être broyé beaucoup plus finement que le ciment Portland et le ciment Portland de fer. Or, le broyage fin est coûteux, car le rendement des broyeurs diminue avec la finesse du produit en même temps qu'augmentent les frais d'usure, de réparations et de force motrice.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET PHYSIQUES DES CIMENTS DE LAITIER ET DE PORTLAND DE FER

Pour fournir des ciments de qualité uniforme, il est essentiel que les scories aient une composition chimique constante et que leur teneur en alumine et chaux ne s'écarte pas des limites indiquées plus haut. Il est donc nécessaire de procéder à des analyses pour ainsi dire journalières qui permettent de discerner les scories utilisables de celles qui ne le sont pas.

Les scories de haut-fourneau sont des silicates de chaux et d'alumine ; d'après les expériences de Tetmajer (1), leur degré d'activité dépend du rapport qui existe entre leur teneur en chaux (généralement inférieure à 58 %) et leur teneur en silice ; elles deviennent inutilisables lorsque ce rapport descend à 1,0. Cependant le rapport de l'alumine à la silice présente également de l'importance ; le cas le plus favorable est celui où ce rapport est compris entre 0,45 et 0,50. Sur trente analyses de scories très diverses faites par Tetmajer, la valeur la plus élevée du rapport $\frac{CaO}{SiO^2}$ a été de 1,72 et la plus faible de 0,64 ; moyenne 1,35.

Composition chimique des ciments de laitier. — En ce qui concerne la composition chimique du ciment de laitier prêt à être livré au commerce, elle a été déterminée par Tetmajer (2) sur 14 échantillons. Voici les chiffres obtenus qu'il est intéressant de rapprocher de ceux afférents au ciment Portland de fer :

(1) *Mitteilungend. Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien am Polytechnikum in Zurich*, Heft 6 (1893) et Heft 7 (1894).

(2) *Der Schlackcement. Notizblatt des Ziegler et und Kalkbrennervereins* 1887.

	Ciment de laitier		Ciment Portland de fer
SiO^2....	18,03 à 27,35 %	en moyenne 20,08 %	20,0 à 25 %
Al^2O^3...	9,13 à 18,49 »		9,0 à 15,0 »
Fe^2O^3...	0,34 à 2,14 »		
CaO....	46,76 à 55,61 »	en moyenne 51,31 %	54,0 à 60,0 »
$CaSO^4$..	0,12 à 3,59 »		0,8 à 2,7 »
CO^2....	0,72 à 4,88 »		—
H^2O....	0,76 à 9,61 »		—
MgO...	0,21 à 5,72 »		0,6 à 5,0 »

D'après ces analyses, le rapport de $\frac{CaO}{SiO^2}$ serait donc en moyenne de 2,5 % dans le ciment de laitier, la valeur la plus faible étant de 1,83, et la plus forte de 3,05. Pour les ciments de laitier français analysés au laboratoire de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, les valeurs de SiO^2 varient de 23,85 à 26,6 %, et celles de CaO de 24,4 à 51,1 %; elles donnent donc pour $\frac{CaO}{SiO^2}$ une moyenne de 1,85.

Nous donnerons encore à titre de comparaison les chiffres moyens fournis par l'analyse de 88 ciments Portland, publiés par Tetmajer, et nous placerons en regard ceux publiés par l'association des fabricants de ciment allemands (1).

	Analyses de Tetmajer		Ciments allemands	
SiO^2..	15,32 à 25,48 %	en moyenne 21,14 %	19,30 à 26,45 %	en moyenne 23,12 %
Fe^2O^3.	0,02 à 4,29 »		2,19 à 4,47 »	
Al^2O^3..	4,73 à 20,72 »		4,16 à 9,45 »	
Cao...	45,89 à 66,14 »	en moyenne 59,34 %	58,22 à 65,59 »	en moyenne 60,63 %
MgO..	0,23 à 17,28 »		0,00 à 2,89 »	
$CaSO^4$.	0,23 à 7,90 »		0,19 à 2,19 »	
CO^2...	0,25 à 14,15 »		—	
H^2O...	0,30 à 11,27 »		—	

Dans les ciments analysés par Tetmajer, le rapport $\frac{CaO}{SiO^2}$ est de 2,8 et dans les ciments allemands de 2,62 ; dans ces produits la valeur minima respective est de 2,33 et de 3,47, la valeur maxima est de 2,74 et de 2,94. Dans certains ciments elle varie de 2,44 à 3,03.

La teneur en chaux ne doit jamais descendre au-dessous de

(1) *Der Portland Cement und seine Anwendung*, publié par l'Association des fabricants de ciment allemands.

58 % ni s'élever au-dessus de 66 % pour le ciment de laitier ; pour le ciment Portland de fer la limite supérieure est de 58 % en moyenne. A une teneur plus élevée en chaux le ciment gagne en solidité, mais lorsqu'elle dépasse 66 %, il ne supporte plus l'épreuve de l'ébullition ; par suite, une teneur plus faible implique généralement une plus grande invariabilité de volume. On améliore les ciments à teneur élevée en chaux par l'addition de matières contenant de la silice capable de se combiner.

La teneur en silice, qui influe le plus sur l'hydraulicité, est sensiblement la même dans les deux sortes de ciments ; cependant elle est un peu plus élevée dans le ciment Portland de fer. Plus cette teneur est élevée, plus la prise du ciment est lente au début, mais plus aussi il acquiert de solidité avec le temps.

La raison pour laquelle le durcissement sous l'eau de tous les ciments de laitier donne de meilleurs résultats que le durcissement à l'air est que sous l'eau ils forment du silicate de calcium qui est moins soluble que l'hydrate de chaux.

Pour le mortier de ciment, l'acide carbonique libre constitue un agent destructeur, car il a pour effet de transformer l'hydrate de chaux mis en liberté en bicarbonate de chaux, qui est soluble dans l'eau. C'est pour ce motif aussi que les scories de haut-fourneau granulées sont séchées jusqu'au rouge sombre et débarrassées ainsi de tout l'acide carbonique. Cependant, la calcination des scories n'a nullement pour effet d'améliorer leur qualité, ainsi que le montrent des recherches faites à la station d'essais de Charlottenbourg ; bien plus, elle a pour résultat de diminuer un peu leur pouvoir de durcissement Mais, quand il est exposé à l'air, le carbonate de chaux formé continue à se combiner, et c'est sur ce fait qu'est basé le durcissement du mortier. Or, la présence de scories de haut-fourneau se combinant avec l'hydrate de chaux exclut la formation de carbonate de chaux, et ceci explique pourquoi les ciments de laitier se durcissent moins fortement à l'air. Par suite, l'addition de ciment de laitier au ciment Portland n'acquiert toute sa valeur que lorsque le mélange est employé à des constructions sous l'eau et durcissant sous l'eau.

Propriétés physiques des ciments de laitier. — Les propriétés physiques des deux ciments qui nous occupent ont été également étudiées par Tetmajer. Voici les moyennes de 68 analyses de *ciment de laitier* effectuées par ce savant :

	Poids spécifique	Pertes à la calcination %	Poids du volume — Vase rempli à la main sans tasser		Poids du volume — Vase rempli à la machine en tassant
Valeur moyenne	2,66	7,57	1,020	0,930	1,540
Valeur maxima.	2,92	11,02	1,120	1,050	1,800
Valeur minima.	2,61	3,62	0,780	0,720	1,130
	Ciment Portland. Résultat de 343 analyses du même auteur				
Valeur moyenne	3,07	2,82	1,28	1,20	1,90
Valeur maxima.	4,06	8,03	1,88	2,02	2,46
Valeur minima.	2,85	0,42	0,93	0,87	1,18
	Ciment Portland de fer. Résultats de 16 analyses				
Valeur moyenne	3,00	2,04	1,14	1,04	1,74
Valeur maxima.	3,05	3,88	1,19	1,07	1,98
Valeur minima.	2,86	0,42	1,03	1,00	1,65

On voit que pour les ciments Portland le poids spécifique est en moyenne de 3,1 et la perte à la calcination d'environ 3,0 %, tandis que pour le ciment de laitier le poids spécifique est généralement inférieur à 2,8 et que la perte à la calcination varie de 4 à 11 %. Pour le ciment Portland de fer le poids spécifique est inférieur à 3,1 et la perte à la calcination est inférieure à 3 % comme pour les ciments Portland. Plus le poids spécifique est élevé, plus le mortier est dense et résistant. Les chiffres ci-dessus font donc ressortir nettement la valeur des différents ciments comme liants. Le poids du litre de ciment, mesuré en versant les matières sans tasser le récipient, ressortirait à 1.300 gr. pour le ciment de laitier, à 1.450 gr. pour le ciment Portland de fer et à 1.500 gr. pour le ciment Portland; ce dernier chiffre est plutôt trop faible que trop fort.

La finese de broyage d'un ciment exerce une influence extraordinaire sur sa solidité et sur son rendement à l'application. Plus les particules de ciment sont réparties finement dans le mortier, plus rapidement il se combine avec l'eau et mieux il enserre le sable.

Le ciment Portland de fer donne généralement un refus de 0,5 % sur le tamis à 900 mailles, de 1,2 % sur le tamis à 5.000

mailles, et de 12 % sur le tamis à 10.000 mailles ; les ciments français donnent les mêmes valeurs, tandis que le ciment de Kœnigshof donne un refus de 9 % sur le tamis à 4.900 mailles,

La consistance normale des mortiers 1 : 3 est en moyenne de 8 % pour le Portland, de 10 % pour le ciment de laitier et de 9 % pour le Portland de fer, c'est-à-dire que c'est le ciment Portland qui exige le moins d'eau pour la confection du mortier. L'expérience montre que l'addition d'eau doit être modérée, plutôt trop faible que trop forte, car la qualité du mortier dépend de sa consistance.

Temps de prise et résistance du ciment de laitier et du ciment Portland de fer. — Quand il s'agit de matériaux de construction, la première question qui intéresse l'ingénieur est celle de la résistance de ces matériaux déterminée d'après des normes uniformes. Il sera donc intéressant d'indiquer ici les résistances moyennes établies par un grand nombre de déterminations. Les chiffres suivants, extraits des travaux du professeur Tetmajer, nous donnent les résistances comparatives fournies par le ciment Portland et le ciment de laitier placés dans l'eau; ces résistances ont été établies sur des éprouvettes préparées d'après les normes usitées en Suisse.

Résultats de 34 essais faits avec du ciment Portland

	7 jours		28 jours		84 jours		210 jours		1 an		2 ans	
	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression
Moyennes	17,3	142,7	23.3	209,2	28,8	261,0	33,5	317,9	35,3	362,3	35,9	390,6
Maxima .	27,8	241,8	33,0	354,9	39,3	398,8	43,5	470,4	44,9	474,5	35,9	390,6
Minima ..	7,6	46,9	12,2	82,1	21,1	97,9	24,0	136,2	28,0	174,2	35,9	390,6

Résultats de 15 essais faits avec des ciments de laitier de provenances très diverses

	7 jours		28 jours		84 jours		210 jours		1 an		2 ans	
	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression
Moyennes	13,8	107.0	34,5	218,3	31,1	299,9	31,6	281,0	37,1	348,5	42,1	403,8
Maxima ..	17,8	147,4	29,4	272,5	38.8	376,4	35,5	331,6	46.5	406,1	44,5	419,3
Minima ..	8,7	53,0	18,3	151,9	22.4	1 6,1	27,0	253,4	27,6	248,5	40,1	378,7

Le ciment Portland de fer a été l'objet de nombreuses expériences à la station royale d'essais de Charlottenbourg. 14 échantillons différents ont été soumis chacun à 10 essais; des résultats obtenus (sous l'eau) nous extrayons les valeurs moyennes suivantes :

Résultats des essais faits avec le ciment Portland de fer

	7 jours		28 jours	
	Traction	Compression	Traction	Compression
Moyennes......................	19,6	167,8	27,9	267,8
Maxima..........................	26,5	225,0	35,8	357,0
Minima..........................	14,7	121,6	21,4	198,0

En ce qui concerne le durcissement à l'air, les quatre séries d'expériences faites aux stations d'esais de Stuttgart et de Berlin ont fourni les valeurs moyennes suivantes :

	7 jours		28 jours	
	Traction	Compression	Traction	Compression
Moyennes..........................	28,8	213,9	24.9	276,1
Maxima..........................	29,7	291.0	32.3	297,1
Minima..........................	18,2	162,0	24,9	240,9

Les ciments Portland de fer possèdent la propriété de se durcir d'une manière ininterrompue; pour exprimer cette propriété par des chiffres, nous allons donner les moyennes déduites d'une sé-

rie de 24 essais faits avec du mortier (1 : 3) de ciment Portland de fer marque « Kraft ».

	7 jours		28 jours		90 jours		1 an		2 ans	
	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression
Moyennes .	12.8	144,0	26,5	248,0	29,8	300,0	31,7	445.0	36,7	482,0
Maxima ...	22,1	198,6	33,5	320,0	34,0	364,0	40,0	450,0	49,0	628,0
Minima....	15,5	110,0	26,5	234.0	28,0	313,0	30,8	398 0	34,0	415,0

Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux fournis par 10 essais (Michaelis) faits avec du mortier de ciment Portland (1 : 3) dans des conditions identiques :

	7 jours		28 jours		90 jours		1 an		2 ans		3 ans	
	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression	Traction	Compression
Moyennes	13.5	145,6	16,9	198.0	27,0	275,5	29,7	412,3	29,0	430,9	30,4	479,3

On peut conclure de tous ces essais que les ciments de laitier et de Portland de fer ont la même valeur que le ciment Portland au point de vue de la résistance dans l'eau. Il n'y a de restriction que pour le ciment de laitier se durcissant à l'air : pour donner toute sécurité, ce ciment doit être employé dans une atmosphère humide, c'est-à-dire qu'il doit être maintenu humide dans la première période de durcissement. Mais, cette restriction ne s'applique pas au Portland de fer qui, comme le ciment de fabrication normale, peut être appliqué partout avec une égale sécurité.

Faisons remarquer encore que tous les ciments que nous venons de mentionner ont résisté à toutes les épreuves d'invariabilité de volume aussi bien à l'air que dans l'eau, et qu'ils n'ont donné lieu à aucun phénomène d'expansion, même aux épreuves les plus dures.

PROPRIÉTÉS DU CIMENT DE LAITIER PORTLAND (Ciment dit de haut-fourneau) (1)

Invariabilité de volume. — Le phénomène d'expansion du ciment Portland, autrefois si fréquent, est devenu de plus en plus rare dans ces derniers temps, grâce à l'emploi de broyeurs perfectionnés qui permettent de réduire les matières premières à un haut degré de finesse tout en les mélangeant d'une manière parfaite, et à l'introduction du four rotatif qui effectue la cuisson avec une grande régularité. Mais, toutes les fabriques de ciment n'ont pas encore adopté ce nouvel outillage, ce qui explique pourquoi on trouve souvent encore dans le commerce des ciments expansifs. Le ciment de laitier Portland est à l'abri de cet inconvénient, même lorsque le clinker de Portland qu'on y ajoute est expansif, car les éléments nuisibles qui produisent l'expansion du ciment Portland (une teneur trop élevée en chaux, la présence de chaux libre, un excès de gypse ou de magnésie) sont combinés par la silice soluble et par l'alumine du laitier dans le processus de solidification du mortier.

Ceci explique pourquoi les ciments Portland expansifs peuvent être corrigés immédiatement par une addition convenable de laitier finement broyé. Il n'est pas difficile de se rendre compte si un ciment est expansif ou non; mais, on ne peut être fixé sur ce point qu'au bout de 28 jours, et c'est là une circonstance très désagréable pour l'acheteur. On a, il est vrai, un moyen beaucoup plus rapide pour exercer ce contrôle : ce moyen consiste à soumettre à l'ébullition pendant 3-4 heures des galettes de ciment pur 24 heures après le gâchage, après quoi elles doivent être exemptes de fissures et de toute déformation. Mais, les fabricants considèrent cette épreuve comme trop dure, à laquelle ne résistent pas certains ciments qui, normalement, ne donnent aucune expansion. Or, *tous les ciments de laitier Portland sans exception supportent parfaitement l'épreuve de l'ébullition;* ils peuvent être employés dès lors pour la construction de réservoirs à eau chaude. *L'invariabilité de volume est une des qualités fondamentales des ciments de laitier Portland.*

Comme ces ciments sont broyés beaucoup plus finement que

(1) D'après PAROW.

les ciments Portland, ils ont une tendance à se contracter davantage pendant le durcissement. Mais, les petites fissures qui se forment alors le plus souvent au centre des éprouvettes, rarement sur les bords, ne présentent aucun inconvénient et ne doivent pas être confondues avec les crevasses produites par l'expansion.

Temps de prise. — D'après les normes officielles, on distingue les ciments à prise normale et les ciments à prise rapide. Les ciments à prise normale sont ceux qui commencent à faire prise au bout de 1 heure, tandis que ceux à prise rapide commencent à faire prise au bout de quelques minutes. Dans le commerce on distingue les ciments à prise normale, à prise lente, à prise rapide et pour coulage. Le ciment à prise normale, qui fait prise au bout de 1-2 heures, est employé par l'industrie du bâtiment ; le ciment à prise lente, qui fait prise au bout de 4-8 heures, sert principalement pour l'exécution des travaux en béton; le ciment à prise rapide (4-7 minutes) sert généralement à couler des ornements et à confectionner des ouvrages en stuc.

Les ciments Portland sont le plus souvent à prise rapide, tandis que les ciments de laitier Portland sont à prise normale ou à prise lente : une addition de gypse retarde la prise des premiers, elle accélère celle des seconds. En outre de cette régularisation du temps de prise, l'addition de gypse aux deux ciments présente encore l'avantage d'augmenter considéralement leur résistance. Mais, la plupart des ciments Portland ne supportent qu'une faible addition de gypse : une addition de plus de 3 % de ce produit donne lieu à des phénomènes d'expansion.

On prépare également des ciments de laitier Portland à prise lente pour coulage, par une forte addition de clinker de ciment Portland ; mais dans ces sortes de ciments c'est le Portland qui produit le durcissement : ce sont alors des ciments mixtes et non des ciments de laitier Portland.

Couleur du ciment de laitier Portland. — Les ciments de laitier Portland ont le plus souvent une couleur gris clair. Certaines fabriques, grâce à la pureté du laitier, sont à même de fabriquer des ciments presque blancs qui se prêtent plus spécialement à la confection de pierres artificielles. Grâce à la faible teneur de ces ciments en chaux en excès, les objets qui en sont fabriqués ne se délitent pas à l'air comme la plupart de ceux faits avec du ciment riche en chaux, ils ne se recouvrent pas d'exsudations et conser-

vent une teinte pure. Les ciments de laitier Portland qui font prise sous l'eau se colorent par suite de la formation d'un peu de sulfure de fer; mais cette coloration disparaît de nouveau rapidement à l'air, elle n'influe d'ailleurs nullement sur la qualité de ces ciments. Comme la présence des composés sulfurés favorise la réactivité du laitier, on constate régulièrement que ce sont précisément les éprouvettes colorées en vert foncé à la suite de leur séjour dans l'eau qui accusent les résistances les plus grandes.

Finesse de mouture. — Le ciment de laitier Portland doit être moulu très fin. Plus la mouture est fine, plus est intime le mélange du laitier et du clinker de Portland, plus le ciment acquiert de qualité et plus on pourra ajouter de sable pour la confection du mortier.

Pour les travaux de crépissage, il est recommandable de se servir d'un mortier pas trop gras fait avec du sable fin, ce qui permet d'éviter la formation de petites fissures dans le durcissement.

La finesse de mouture a une très grande importance pour le ciment de laitier Portland, car le laitier est par lui-même à prise beaucoup plus lente que le ciment Portland normal; il s'ensuit qu'il doit être moulu beaucoup plus fin pour donner les mêmes résultats que le Portland normal à grain moins fin. C'est tellement vrai que sans le secours des appareils perfectionnés de broyage que l'on possède actuellement, il eût été impossible de réduire le laitier à une finesse assez grande pour en faire un ciment pouvant entrer en concurrence avec le ciment Portland et le ciment Portland de fer. Si ces deux derniers ciments étaient réduits à la même finesse que celle requise pour le ciment de laitier Portland, ils seraient à prise tellement rapide malgré une forte addition de gypse, qu'ils seraient absolument impropres pour l'industrie du bâtiment. Le ciment de laitier Portland du commerce ne donne en moyenne qu'un refus de 8,2 % sur le tamis à 5.000 mailles par cm^2, tandis que le ciment Portland donne un refus moyen de 18,7 % sur le même tamis (résultat de 99 analyses).

Invariabilité du ciment de laitier Portland pendant le magasinage. — On avait pensé autrefois que le laitier, préparé convenablement et broyé seul pourrait fournir par lui-même un ciment utilisable. Et de fait, certaines scories de haut-fourneau peuvent être refroidies de telle sorte qu'elles donnent un mélange de deux

laitiers distincts : le laitier vitrifié et le laitier dévitrifié qui, broyés finement, donnent du ciment sans autre addition. Les parties vitreuses, qui produisent le durcissement, exigent le concours d'une petite quantité de composés calcaires capables de se combiner, et ceux-ci sont fournis par le laitier dévitrifié. Mais, comme ces composés calcaires du laitier dévitrifié sont très faibles, ils ne tardent pas à se carbonater au contact de l'air pendant leur conservation et à devenir inactifs. C'est pourquoi ces sortes de ciments, préparés sans autre addition, se détériorent rapidement. Or, comme le ciment Portland contient toujours un grand excès de chaux, qui s'en sépare incessamment durant la prise et le durcissement, il constitue précisément la matière additionnelle la meilleure et la plus efficace pour assurer la conservation du ciment de laitier Portland : le laitier vitreux, qui ne se modifie pas au contact de l'air, enrobant les granules de ciment Portland qu'on y mélange au broyage, les prémunit contre toute altération. On comprend dès lors que le ciment de laitier Portland puisse se conserver tout aussi bien que le ciment Portland.

Durcissement et résistance du ciment de laitier Portland sous l'eau et à l'air. — Le ciment de laitier Portland se durcit à l'air et sous l'eau. Dans le premier cas, il donne des résistances beaucoup plus grandes que dans le second; mais il faut veiller à assurer aux travaux une certaine humidité pendant quelque temps après leur achèvement. Dans ces conditions, le ciment de laitier Portland convient tout aussi bien pour les travaux à l'air que pour les travaux sous l'eau. Il donne des mortiers (1 : 6) dont la résistance n'est pas inférieure à celle des mortiers de Portland et de ciment Portland de fer; il en est de même pour les mortiers 1 : 10 pour béton.

Résistance du ciment de laitier Portland à l'action de l'eau de mer. — Les ciments de laitier Portland se distinguent par une haute résistance à l'action de l'eau de mer et des autres eaux salées. Tandis que le ciment Portland et les ciments de laitier sont plus ou moins attaqués par ces eaux, le ciment de laitier Portland y accuse souvent des résistances plus élevées que dans l'eau ordinaire. Grâce à cette propriété, ce ciment peut être employé à certaines constructions où les autres ciments ne peuvent servir.

Faisons remarquer à ce propos que les conclusions qu'on tire généralement des essais de laboratoire ne doivent pas être assi-

milés sans plus à ceux de la pratique, car il est absolument impossible de réaliser artificiellement les conditions qui se présentent dans la nature. Malgré cela, les essais de laboratoire sont indispensabes en tant qu'ils permettent de se rendre compte du degré de résistance qu'offre un ciment donné à l'action chimique des eaux de mer.

Le ciment de minerai, par exemple, qui est excessivement résistant à l'action de tous les agents chimiques, n'a pas été adopté par la pratique, parce que, indépendamment de son prix de revient qui est très élevé, il est difficile à travailler, peu avantageux à l'emploi et à prise beaucoup trop lente.

Actuellement, l'épreuve de résistance des ciments à l'eau de mer exige une durée d'observation très longue, car beaucoup de ciments qui dans le mélange habituel 1 : 3 se conservent pendant des mois, sont ensuite attaqués subitement et s'effritent en un temps relativement court. Or, ce temps d'attente entrave sérieusement les opérations du fabricant de ciment.

Le fait que les ciments de laitier Portland résistent mieux à l'eau de mer que toutes les autres sortes de ciments a incité l'union des fabricants allemands à soumettre les premiers à une série d'épreuves dans des conditions variables. Ils ont été amenés à en conclure que, lorsqu'il s'agit de ciments destinés aux travaux à la mer, le clinker de Portland ajouté au ciment de laitier Portland devait être choisi très judicieusement. Ce clinker doit être pauvre en alumine, riche en silice, à teneur modérée en chaux; son addition au laitier ne doit pas être exagérée, mais juste suffisante pour apporter la quantité de chaux nécessaire. Parow, contrairement à l'avis de certains spécialistes, conseille de ne pas ajouter une quantité exagérée de gypse dont le sulfate, ajouté à celui apporté par l'eau de mer, peut provoquer de l'expansion.

Ce n'est pas seulement dans les essais de laboratoire que le ciment de laitier Portland a montré ses hautes qualités de résistance, mais encore dans des expériences directes faites au port de guerre de Heligoland. Au bout de 24 heures le béton 1 : 3 et 1 : 5 accusait déjà une grande dureté; trois mois plus tard il était devenu tellement dur qu'on n'a pu que difficilement en détacher des fragments au ciseau. Dans ces expériences le béton a été alternativement recouvert d'eau et mis à nu par l'action de la marée.

La résistance à l'eau de mer, à l'eau des marais, bref à toutes

les eaux qui sont susceptibles de former des sulfates dans le ciment solidifié, se rattache étroitement à la teneur de celui-ci en sulfate de chaux ajouté. En présence du plâtre il se forme dans le ciment Portland du sulfo-aluminate de calcium qui, en cristallisant, absorbe environ 30 molécules d'eau; il en résulte une forte augmentation de volume qui fait éclater le mortier. Or, il est clair que le danger de formation de sulfo-aluminate de calcium est le plus grand dans les ciments qui contiennent un excès de chaux et d'alumine.

Presque tous les fabricants de ciment de laitier Portland préparent le clinker additionnel de Portland en employant comme matière première du laitier, le broyant avec la quantité de calcaire nécessaire et faisant cuire le mélange jusqu'à scorification. Comme le laitier est souvent très riche en alumine, on obtient ainsi un ciment plus riche en alumine que celui qu'on obtient par la mise en œuvre des matières premières naturelles. Or, le ciment riche en alumine ne supporte pas une aussi forte addition de gypse que le ciment pauvre en alumine, parce qu'une forte teneur en alumine favorise la formation du sulfo-aluminate. C'est ce qui explique pourquoi les ciments de laitier (Portland de fer), qui se composent de 70 % de clinker riche en alumine, sont beaucoup plus sensibles à l'influence du plâtre que les ciments ordinaires. Comme le laitier est par lui-même le plus souvent insensible à l'action du plâtre, il est clair que la résistance des ciments de laitier Portland augmente dans la mesure où leur teneur en clinker de Portland diminue. Ainsi, par exemple, un ciment de laitier Portland préparé avec 80 % de clinker riche en alumine et additionné de 10 % de gypse s'est montré très expansif au bout de quelques jours. Le même laitier, broyé avec 5 % du même clinker de Portland, et additionné de 30 % de plâtre, ne donna pas trace d'expansion.

Les composés sulfureux du ciment de laitier Portland. — Tous ceux qui s'occupent de ciment ont l'habitude de comparer les ciments, quels qu'ils soient, avec le ciment Portland, qui en est en quelque sorte le type classique. Ils sont dès lors portés à considérer comme nuisibles pour ces ciments toutes les matières qui sont nuisibles au Portland. Et l'expérience montre que la présence d'une proportion plus ou moins grande de gypse (sulfate de calcium) est plus ou moins nuisible aux ciments Portland. Or, com-

me le laitier de haut-fourneau contient du sulfure de calcium, on en a conclu que dans la solidification des ciments qui en sont fabriqués le sulfure de calcium dut se transformer par oxydation en sulfate de calcium et donner lieu à des expansions. Partant de ce fait on s'était évertué, il y a quelques années, à diminuer autant que possible la teneur en sulfure de calcium du laitier destiné à la fabrication du ciment en grillant ce laitier après granulation, en injectant de l'eau et de l'air dans les scories incandescentes, et en pulvérisant ces dernières avec des solutions salines.

Il est de fait que durant le durcissement le sulfure de calcium se transforme en sulfate. Mais, comme une teneur aussi élevée en sulfate que celle qui peut se former ici non seulement n'est pas nuisible, mais même utile au ciment de laitier Portland, il s'ensuit qu'une teneur élevée en sulfure de calcium (jusqu'à 12 %) (1) augmente la réactivité du laitier sans entraîner de réactions secondaires. On aurait dû, par conséquent, chercher plutôt à augmenter qu'à diminuer la teneur des scories en sulfure de calcium. Mais, l'essentiel, est de refroidir rapidement le laitier dans le travail de granulation et de l'amener ainsi à un état aussi vitreux que possible.

D'un autre côté, l'expérience a démontré que les combinaisons sulfureuses du ciment de laitier Portland n'exerçaient pas sur les armatures en fer du béton l'action nuisible qu'on avait redoutée tout d'abord. Le fer du béton ne se rouille qu'au contact de l'air et de l'eau. Lorsque le béton est damé très sec, il s'y forme facilement des creux dans lesquels l'eau et l'air peuvent pénétrer et produire de la rouille. Il s'ensuit qu'un béton en mélange gras offre moins de danger à ce point de vue qu'en mélange maigre.

On avait admis autrefois que, au contact de l'humidité, le sulfure du calcium du laitier se transformait en sulfure d'hydrogène et que celui-ci se transformait par oxydation en acide sulfurique, qui attaque le fer. Mais ce danger n'existe que lorsqu'on emploie pour la fabrication du ciment des scories acides, pauvres en chaux — ce qui n'arrive jamais.

Comparaison du ciment de laitier Portland avec le ciment de laitier. — On confond souvent les ciments de laitier Portland avec

(1) STAL u. EISEN, 1909, p. 33.

le ciment de laitier proprement dit, quoiqu'ils s'en distinguent par leurs propriétés.

Le laitier normal de haut-fourneau contient les mêmes éléments que le ciment Portland, mais en d'autres proportions, comme le montrent les analyses suivantes :

	Ciment Portland	Laitier haut-fourneau
Chaux	60 à 65 %	45 à 55 %
Silice	20 à 24 »	27 à 36 »
Alumine et oxyde de fer	6 à 14 »	8 à 20 »
Magnésie	0,5 à 3 »	0,5 à 5 »

On voit que le laitier contient beaucoup moins de chaux que le ciment Portland. Pour combler la différence on s'est contenté d'y ajouter de l'hydrate de chaux, et c'est ainsi que l'on fabrique le ciment de laitier en mélangeant 70 % de laitier et 30 % d'hydrate de chaux réduit en poudre fine.

En Allemagne le ciment de laitier (qu'il ne faut pas confondre avec le ciment Portland de fer) n'a pas réussi à concurrencer le ciment Portland. Quoique sa résistance à la traction ait été jugée satisfaisante, sa résistance à la compression est toujours inférieure à celle du Portland. Son durcissement à l'air est moins bon que son durcissement sous l'eau; en outre, il se conserve parfois très mal. Tous ces défauts du ciment de laitier s'expliquent :

L'hydrate de chaux libre mélangé au laitier absorbe, pendant sa conservation en magasin, de l'acide carbonique, qui non seulement ne joue aucun rôle dans la prise et le durcissement, mais diminue la résistance à la compression. C'est également la présence de l'hydrate de chaux libre qui rend le ciment de laitier inutilisable dans les travaux à la mer, où il se comporte encore plus mal que le ciment Portland.

Le ciment de laitier Portland (ciment dit de haut-fourneau) ne contient pas d'hydrate de chaux libre décomposable par l'acide carbonique de l'air, et le ciment Portland qu'on y ajoute ne sépare la chaux nécessaire au durcissement que lorsqu'il est gâché avec de l'eau. Or, cette chaux mise peu à peu en liberté est fixée par les scories vitreuses du ciment de haut-fourneau et on obtient ainsi les mêmes combinaisons que dans le ciment Portland et le Portland de fer.

Est-il possible de préparer le ciment de laitier Portland par le simple mélange de scories et de ciment Portland ?. — Théori-

quement peut-être ; pratiquement non. La grosse difficulté consiste précisément dans la question d'appropriation des scories au but à atteindre, et ce point ne peut être fixé que par des recherches chimiques et microscopiques. Ce qui complique encore la chose, c'est que les différentes scories se comportent très différemment avec un seul et même ciment Portland, et réciproquement. Certaines scories n'exigent qu'une faible addition de Portland pour donner d'excellents résultats, d'autres exigent une quantité double ou triple. L'addition de certaines scories à des ciments Portland à prise lente a pour effet de les transformer en ciments à prise tellement rapide qu'ils deviennent impropres à la construction ; d'autres fois elle modifie considérablement leurs résistances, etc.

Il s'ensuit que les scories de haut-fourneau et le ciment Portland ne doivent pas être mélangés au petit bonheur, mais uniquement sur la base de leur analyse et de l'étude de leurs propriétés hydraulisantes. Il y a déjà 30 ans que Michaelis, dans une circulaire, avait fait ressortir l'importance de ces considérations.

*
* *

Une circulaire du Ministre des travaux publics de la Prusse, en date du 16 mars 1910, prescrit les normes suivantes pour le ciment Portland de fer.

I. *Définition du ciment Portland de fer.* — Le ciment Portland de fer est un liant hydraulique composé de 70 % au minimum de ciment Portland et de 30 % au maximum de scories de haut-fourneau granulées. Le ciment Portland qui entre dans ce mélange sera fabriqué d'après les normes établies par l'association des fabricants de ciment allemands. Les scories de haut-fourneau sont des silicates de chaux et d'alumine obtenus dans le traitement du fer dans les hauts-fourneaux. Elles doivent contenir au minimum 1 partie (poids) de chaux et de magnésie pour 1 partie (poids) d'acide silicique soluble (SiO^2) + alumine (Al^2O^3). Le ciment Portland et les scories de haut-fourneau doivent être moulus finement et mélangés ensemble intimement à l'usine même. Il n'est pas défendu d'y ajouter d'autres matières dans un but spécial, notamment pour régler le temps de prise ; ces additions toutefois ne doivent pas dépasser 3 % de la masse totale, afin d'exclure tou-

tes manœuvres qui n'auraient d'autre but que d'augmenter le poids de la marchandise.

Exposé des motifs et justification. — De nombreuses expériences officielles exécutées depuis de longues années ont démontré que, si l'on mélange intimement avec le clinker de Portland 30 % de scories de haut-fourneau granulées, on obtient un « ciment Portland de fer » qui a la même valeur et les mêmes propriétés que le ciment Portland et peut être apprécié d'après les mêmes normes que ce dernier.

Le ciment Portland de fer est placé sous le contrôle régulier de l'association des fabricants allemands de ciment Portland dont les membres se sont engagés mutuellement à fabriquer le ciment Portland de fer exactement d'après la définition donnée plus haut.

II. *Emballage et poids.* — Le ciment Portland de fer est emballé en sacs ou en barils. L'emballage devra indiquer d'une manière apparente le poids brut de la marchandise, porter la mention « ciment Portland de fer », le nom du fabricant et la marque de fabrique déposée à l'office des brevets. Le coulage et les différences de poids jusqu'à 2 % ne pourront donner lieu à réclamation.

Exposé des motifs et justification. — Comme l'emballage en sacs et en barils comporte des poids différents suivant les usages locaux, l'inscription du poids brut sur l'emballage est une condition indispensable. La désignation de « ciment Portland de fer » et l'apposition de la marque de fabrique ont pour but de donner à l'acheteur la garantie que la marchandise est réellement fabriquée d'après les normes établies pour elle.

CONCLUSION DES ESSAIS OFFICIELS DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS SUR L'ASSIMILATION DÉFINITIVE, EN ALLEMAGNE, DU CIMENT PORTLAND DE FER AU CIMENT PORTLAND (1).

On sait avec quelle ténacité l'Association allemande des fabricants de ciment Portland a combattu près de 30 ans l'addition du laitier des hauts-fourneaux dans la proportion de 30 % au ciment Portland ordinaire après cuisson, c'est-à-dire le produit aujourd'hui très répandu en Allemagne sous le nom de ci-

(1) STAL und EISEN, XXIV, p. 441 et 1366 (1909).

ment Portland de fer. Depuis de longues années, une commission permanente de l'Association s'était livrée à des essais destinés à démontrer l'infériorité du ciment additionné et dont les résultats étaient communiqués chaque année à l'Assemblée générale de l'Association. De leur côté, les fabriques allemandes de ciment Portland de fer se sont groupées en association en vue de faire reconnaître l'équivalence des deux produits et l'identité des normes auxquelles ils doivent être soumis. Ces polémiques incessantes se sont terminées par une décision ministérielle consacrant l'assimilation absolue du ciment Portland pur et du ciment additionné, ou ciment Portland de fer, décision qui a été prise dans les conditions suivantes :

Sur la demande de l'Association des fabriques allemandes de ciment Portland de fer, le Ministre des Travaux publics a nommé en 1901, en vue de donner au débat une solution définitive, une Commission composée de 26 membres, et où étaient représentés : le Ministère des Travaux publics, le Ministère de la Guerre, ainsi que les autres Ministères prussiens intéressés, le Ministère impérial de la Marine, le Laboratoire royal d'essais des matériaux de construction, l'Association allemande des fabricants de ciment Portland, l'Industrie allemande du béton, l'Union des propriétaires d'exploitation de trass, et enfin l'Association des fabriques allemandes de ciment Portland de fer. La Commission comprenait en outre deux savants d'une complète impartialité, le Dr H. Wedling et le Dr Michaelis ; elle était présidée par M. von Doemming, directeur au Ministère, et avait son siège au Ministère des Travaux publics à Berlin.

Cette Commission, qui réunissait à la fois toutes les compétences et tous les intérêts divers, a établi un programme de travaux très étendu dont l'exécution a été confiée au Laboratoire officiel d'essais de matériaux de construction de Gross Lichterfelde. Toutes les objections présentées contre le ciment Portland de fer ont été soumises successivement à des essais faits avec le plus grand soin. Des expériences spéciales ont eu notamment pour objet la comparaison des différentes additions ; elles ont établi que, contrairement aux assertions des fabricants de ciment Portland pur, l'addition de sable même à un état de finesse beaucoup plus grande, donne des résultats non comparables et bien inférieurs à ceux que donne l'addition de laitiers basiques, tels que ceux qui sont

employés dans la fabrication du ciment Portland de fer. D'autres essais ont eu pour but la comparaison avec le trass et la chaux jusqu'à une durée de durcissement de deux années. Les deux sortes de ciment ont été essayées de la façon la plus minutieuse, en dosages maigres et en dosages gras, avec le sable normal et avec le sable composé, avec durcissement à l'eau et à l'air. Des enduits de grande surface et des piles de maçonnerie ont été exécutés, puis mis en observation pendant plusieurs années. L'invariabilité de volume des éprouvettes a été contrôlée et tous les résultats ont été traduits par des graphiques.

La Commission a, en résumé, soumis à un contrôle impartial et sévère tout ce qui avait été dit et écrit depuis près de trente ans contre le ciment Portland de fer, et cela en présence des représentants de l'Association des fabricants allemands de ciment Portland. Les résultats des expériences du Laboratoire officiel d'essais ont toujours été intégralement communiqués à tous les membres de la Commission un temps assez long avant chaque séance, les réunions ayant lieu une ou deux fois par an pour discuter les résultats obtenus. C'est ainsi que le programme primitif s'est étendu graduellement d'une façon considérable et a finalement porté sur un nombre de marques de ciment bien plus grand qu'on ne l'avait décidé à l''origine. En vue d'assurer un échantillonnage absolument impartial des différentes marques, une sous-commission spéciale a fait pendant quinze jours tout le tour de l'Allemagne pour prélever des échantillons directement dans les silos de fabrication.

Dans la réunion finale de la Commission ministérielle, les résultats de près de huit années d'essais scientifiques et d'expériences coûteuses ont été discutés par toutes les parties et l'accord s'est fait à l'unanimité sur la conclusion proposée par les représentants du Ministère des Travaux publics, dans les termes suivants :

D'après les résultats des essais, *les ciments Portland de fer et les ciments Portland doivent être considérés d'une façon générale comme équivalents;* par conséquent, dès lors que les ciments Portland de fer donnent aux essais effectués suivant les normes en vigueur des résultats satisfaisants également au durcissement à l'air, il n'y a pas la moindre objection à présenter contre leur emploi dans les travaux pubics.

Il est à remarquer que cette décision a reçu également l'assentiment des représentants autorisés de l'Association des fabricants de ciment Portland, qui serait dès lors mal venue à la combattre. La même décision ministérielle, en date du 6 mars 1909, consacre l'assimilation complète des deux sortes de ciments pour les adjudications de travaux publics, à la condition que la composition et le mode de fabrication du ciment soient bien définis.

Il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que la clientèle n'a pas attendu cette consécration officielle pour reconnaître l'équivalence des deux produits, les livraisons de ciment Portland de fer ayant passé graduellement, de 1899 à 1908, de 57.305 tonnes (dont 5.458 aux administrations) à 188.479 tonnes (dont 69.268 aux services publics).

NORMES POUR LA LIVRAISON ET LES ÉPREUVES DU CIMENT DE LAITIER PORTLAND (CIMENT DIT DE HAUT-FOURNEAU)

Définition. — Le ciment de laitier Portland est un liant hydraulique composé principalement de scories granulées de haut-fourneau, additionné de ciment Portland, avec lequel il est broyé et mélangé intimement. Les scories de haut-fourneau sont des silicates de chaux et d'alumine.

Le ciment Portland ajouté est obtenu par la cuisson jusqu'à scorification d'un mélange de chaux et de matières alumineuses. Dans un but spécial, notamment en vue de régler le temps de prise, on peut y ajouter au maximum 5 % de matières étrangères.

Exposé des motifs et éclaircissements. — Dans le ciment Portland de fer le principal facteur du durcissement est le clinker de ciment Portland dont l'action est soutenue par le clinker qu'on y mélange au broyage, tandis que dans le ciment de laitier Portland le principal facteur du durcissement est le laitier de haut-fourneau. Le ciment Portland qu'on y ajoute constitue un adjuvant indispensable. Ainsi, le ciment Portland de fer se compose de 70 % de clinker de ciment Portland et de 30 % de laitier granulé. Pour le ciment de laitier Portland il est impossible de fixer une fois pour toutes la quantité de clinker de ciment Portland à ajouter, car elle varie chaque fois suivant la composition des scories et celle du ciment Portland.

En Allemagne, le ciment de laitier Portland est placé sous le contrôle régulier de l'Union des fabricants de ce produit, dont

les membres se sont engagés à conformer leur fabrication aux normes ci-dessus.

Emballage et poids. — Le ciment de laitier Portland est emballé en sacs ou en barils. L'emballage porte l'inscription du poids brut, la désignation du produit et la marque du fabricant. Des différences allant jusqu'à 2 % du poids ne peuvent donner lieu à la réclamation.

Temps de prise du ciment. — Le ciment de laitier Portland à prise normale ne doit commencer à se solidifier qu'une heure après le gâchage. Pour des applications spéciales on peut demander du ciment à prise plus rapide, celui-ci doit être alors désigné comme tel.

On a fixé à au moins une heure le commencement de la solidification parce que ce point a de l'importance; par contre, on a renoncé à fixer une durée déterminée pour le durcissement, parce que ce point est de peu d'importance pour le ciment de laitier Portland.

Pour se faire une idée de la prise, on opère sur 100 gr. de ciment pur pendant 3 minutes pour ciment à prise lente, pendant 1 minute pour ciment à prise rapide; on le gâche avec 27 à 30 % d'eau sur une plaque de verre pour en former une galette de 1,5 cm. d'épaisseur et s'amincissent vers le bord.

CHAPITRE IX

TRANSBORDEMENT ET MANUTENTION ÉCONOMIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES PRODUITS FABRIQUÉS

Dans les fabriques de ciment, les installations de transport à examiner s'appliquent au convoyage des matières premières, du combustible et à la répartition des produits intermédiaires et des produits achevés.

Nous pourrons donc distinguer les installations qui servent au transport des matières premières, celles qui assurent leur répartition dans la fabrique de ciment et enfin celles qui servent au transbordement des produits intermédiaires et des produits fabriqués.

Les dispositifs de convoyage et de manutention du combustible forment une catégorie à part comportant de nombreuses variantes.

Les matières premières à transporter sont : la pierre à chaux, la marne, l'argile, le trass, etc.

Les carrières d'où on les extrait sont parfois situées aux abords immédiats de l'usine, auquel cas il est relativement facile de relier la station de chargement à celle de déchargement.

Les matières chargées dans des wagonnets roulant sur rails sont amenées à un système de voies funiculaires qui les transporte à l'usine.

D'une manière générale cependant, le problème à résoudre consistera à transporter les matières premières sur une assez grande distance pour les convoyer à l'usine. Si la situation topographique permet alors de relier l'usine avec la carrière jusqu'à une distance de 10 à 15 km., le système funiculaire fournira un excel-

lent moyen de transport. Dans le cas contraire, on sera obligé de faire les transports par voie ferrée ou par les fleuves et les canaux.

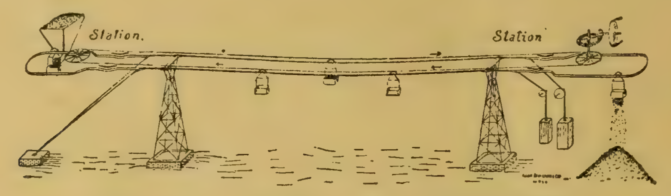


Fig. 122. — Schéma d'une voie funiculaire

La voie fiuniculaire constitue alors le moyen le plus simple de relier la station de chargement des wagons ou des bateaux avec la carrière et la station de chargement de ces véhicuels avec la fabrique de ciment ; ce système permet donc d'utiliser des gisements éloignés.

Les transports funiculaires conviennent tout particulièrement pour le convoyage des matières nécessaires aux fabriques de ciment. Le système à deux câbles est composé de deux câbles porteurs ancrés solidement dans le sol à une extrémité, soutenus par des consoles et tendus à l'autre par des contrepoids (*fig.* 122).

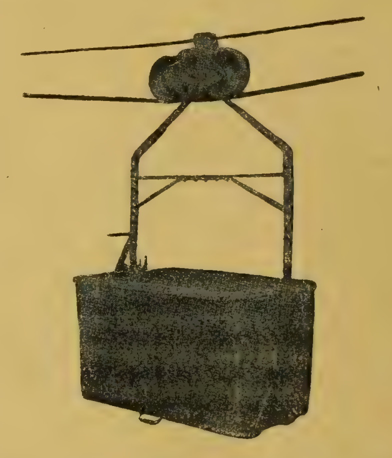


Fig. 123. — Benne normale pour voie funiculaire, avec dispositif de vidange automatique pour le transport de la pierre calcaire, etc.

Sur ces câbles roulent des chariots soutenant les bennes qui sont entraînées continuellement par un câble sans fin auquel ils sont fixés à l'aide d'appareils d'accouplement (*fig.* 123).

Les bennes pleines roulent sur le câble et se rendent vers la station de déchargement, où elles se vident par déclanchement automatique, et retournent au point de départ par le câble parallèle.

De ce qui précède, il ressort clairement que le bon fonctionnement d'un funiculaire exige l'emploi d'un bon système d'accouplement destiné à entraîner les bennes par le câble tracteur. Comme un funiculaire doit fonctionner autant que possible d'une ma-

nière automatique, il s'ensuit que les appareils d'accouplement doivent se fixer d'eux-mêmes sur le câble tracteur et se désaccoupler de même.

Les appareils d'accouplement doivent saisir automatiquement le câble tracteur et s'y maintenir assez solidement pour éviter tout accident. On trouve souvent dans les funiculaires des câbles entraîneurs de différents diamètres, notamment quand on remplace un vieux câble par un neuf. Celui-ci doit avoir le même nombre de torons et par suite le même diamètre que le câble qu'il remplace.

Or, le vieux câble tracteur s'est allongé, de sorte que les deux pièces n'ont pas le même diamètre. Il est donc indispensable que chaque appareil d'accouplement puisse saisir sûrement les câbles tracteurs de diamètres différents, sans qu'il soit nécessaire d'adopter un dispositif spécial.

En outre, les appareils d'accouplement doivent avoir une force de serrage proportionnelle à l'effort nécessaire à l'entraînement des bennes. Il est clair aussi que ces appareils doivent pouvoir franchir sûrement les courbes et les dénivellations. L'appareil d'accouplement satisfait amplement à toutes ces exigences.

Les pylones qui supportent les câbles des voies aériennes sont en bois ou en métal, et d'une hauteur suffisante pour ne gêner en rien le mouvement des véhicules circulant au-dessous. La distance habituelle entre pylones est de 80 à 100 m.; elle peut être portée à 1.000 m. et plus en cas de besoin. Dans la traversée des routes, des chemins de fer et des canaux, on munit la voie de filets protecteurs ou de passerelles destinés à retenir les matériaux qui pourraient éventuellement tomber des bennes trop remplies.

Les câbles doivent être en acier de la meilleure qualité, relativement doux et souple ; l'acier très dur est trop cassant. Le mieux est de se servir de câbles clos à surface lisse, pour la confection desquels on emploie des fils profilés : en cas de rupture d'un fil, celui-ci ne peut alors émerger du câble ni nuire à son fonctionnement. Les contrepoids ont pour but d'équilibrer les influences de la température et de la charge et de maintenir ainsi les câbles à une tension constante.

Les bennes peuvent être à basculement, comme le montre la figure 123 ; mais pour simplifier leur fonctionnement, on utilise souvent aussi les caisses des wagonnets employés dans les carrières

avec ou sans leur truck de roulement, de manière à éviter tout travail de déchargement et de rechargement pendant le transport. Les bennes ont une capacité de 1 à 7,5 hl. et déversent leur contenu dans les trémies de remplissage ; leur vidange est le plus souvent automatique.

En supposant que 250 wagonnets parcourent la ligne à des intervalles de 15 secondes, le rendement de celle-ci est de 250 tonnes par heure. Cependant, les voies aériennes de transport par câble peuvent être rémunératrices même pour des rendements beaucoup plus faibles. La force motrice nécessaire varie suivant la nature du terrain et la direction du convoyage. Si la voie possède une pente suffisante, elle fonctionne d'une manière automatique dans la plupart des cas. On absorbe alors par les freins l'excédent de force ou bien on l'utilise pour actionner des perforatrices ou des appareils analogues dans les carrières. Ces voies peuvent franchir des dénivelations présentant des rampes jusqu'à 45°.

A l'intérieur des usines, la voie par câbles aériens est souvent prolongée sous forme de voie à rails fixes, et actionnée par un câble sans fin ou à la main. La station de chargement de la voie funiculaire est souvent combinée avec des voies à câbles et à chaîne fixées sur le sol.

Une importante installation de ce genre fonctionne à la fabrique de ciment de Labathan en Hongrie. Elle se compose de plusieurs lignes, dont les principales sections conduisent en ligne droite de la station de chargement située dans la carrière inferieure jusqu'à la station d'angle distante de 2 km. 500 et de là à la station centrale de l'usine située à 1 km. plus loin. De cette station centrale partent 2 voies aériennes ayant chacune 115 m. de longueur et allant aux dépôts situés près du four circulaire. A la station de chargement de la carrière inférieure se rattache une autre bifurcation de 240 m. de longueur qui relie avec la ligne principale une carrière située à une altitude de 97 m.

Contrairement à une manière de voir très répandue, les voies funiculaires n'exigent pas exclusivement une direction rectiligne; elles peuvent franchir les angles dans la direction horizontale aussi bien que dans la direction verticale.

Bien que, dans la plupart des cas, une voie funiculaire n'impose pas de grandes exigences au point de vue du terrain, de sor-

te qu'il est facile d'en arriver à un arrangement avec les propriétaires, il arrive parfois que ceux-ci ont des prétentions inacceptables ou s'opposent même d'une manière absolue au passage de voies aériennes au-dessus de leurs terrains. Dans ce ca, on fera valoir l'importance économique que présente pour la région l'établissement d'une voie aérienne, parce qu'elle fournit du travail à un grand nombre d'ouvriers. Au besoin, on aura recours à l'expropriation légale. En tout état de cause, on peut contourner le terrain du propriétaire hostile par l'installation d'une voie polygonale que l'apareil d'accouplement « automate » permet d'installer dans des conditions de fonctionnement parfait.

Pour le déchargement des bateaux ou des wagons de chemin de fer, on emploie, concuremment avec les câbles aériens, des grues et des voies suspendues électriques. Pour décharger les bateaux, on se servira de grues de construction ordinaire ou de grues tournantes munies de bennes ordinaires ou de bennes-dragues automatiques pouvant enlever chaque fois une charge de 0,75 à 3 m³.

En ce qui concerne les bennes-dragues dont l'emploi facilite considérablement la manutention des matières en grumeaux, nous ferons remarquer que le mieux est de les actionner à l'aide non de chaînes, mais de câbles qui donnent une plus grande sécurité de fonctionnemet, tandis que les chaînes, dont les anneaux sont recouverts de poussière, d'huile ou de crasse, ne permettent de reconnaître que difficilement les points faibles, de sorte que, quand un anneau se rompt, elles sont hors d'usage et arrêtent le travail.

Les câbles ne présentent pas le même inconvénient, car lorsqu'un toron se rompt, il émerge du câble et permet de reconnaître le point faible. En outre, la rupture d'un toron ne met pas immédiatement le câble hors de service et laisse tout le temps d'y remédier.

Lorsque l'entrepôt ou la fabrique de ciment n'est pas situé immédiatement près du port de déchargement des bateaux, on relie les deux par une voie aérienne funiculaire. On peut encore se servir de la voie suspendue électrique lorsque la présence de bâtiments est un obstacle à l'établissement d'un funiculaire.

La voie suspendue électrique constitue un moyen de transport automatique qui s'adapte merveilleusement aux situations topographiques les plus difficiles et dont le rendement est le même

que pour le funiculaire. L'installation consiste à détacher le chariot du funiculaire et à le munir d'un chariot automoteur à treuil électrique.

Si l'on considère, en outre, que ce chariot ne doit pas rencontrer celui qui le précède sur la même voie, et doit s'arrêter automatiquement pour le chargement, s'arrêter et basculer automatiquement la benne au point de déchargement, et enfin que toute rencontre des chariots est exclue aux points de croisement et de bifurcation, on voit que les problèmes à résoudre sont nombreux et qu'ils ne peuvent être résolus avec toute la sécurité désirable que par l'adoption de systèmes éprouvés à tous les points de vue et sanctionnés par de nombreuses applications.

Les chariots à commande funiculaire sont encore susceptibles de modifications en ce sens qu'on peut les munir d'un treuil qui élève et descend automatiquement la benne.

La figure 123 bis (p. 315) montre un chariot de ce genre, qui fonctionne d'une manière absolument automatique. Comme exemple citons une voie suspendue électrique installée dans une usine à chaux. La voie sortant de l'usine par une baie, transporte la chaux calcinée dans des wagons de chemin de fer et, au retour, ramène du charbon pour les chaudières. Arrivé à l'extrémité de la voie ou à la sortie de la baie, le chariot s'arrête automatiquement et fait descendre la benne ; celle-ci peut être basculée automatiquement dans le wagon ou être remplacée par une benne remplie à la main.

A cet effet, l'ouvrier chargé de ce travail actionne une manette, ce qui a pour effet de faire remonter le chariot avec la benne ; arrivé en haut, le chariot se met en marche et conduit la benne au magasin à chaux où, suivant la position des aiguilles, aux soutes à charbon.

Arrivée à destination, la benne est chargée ou déchargée, suivant le cas, puis le chariot recommence le même parcours. Les mêmes travaux de chargement ou de déchargement s'effectuent dans des conditions identiques lorsqu'il s'agit d'un bateau.

Un exemple de ce genre nous est fourni par l'usine à ciment de Lauffen, qui a installée une voie suspendue électrique d'une longueur de 110 m. et à double réseau.

Sur chacun de ces réseaux court un chariot à treuil suspendu.

Les voies parallèles sur lesquelles se meuvent les chariots cou-

rent dans le sens de la longueur du bateau, de sorte que la benne peut être descendue de n'importe quel point des réseaux, sans qu'il soit nécessaire de déplacer le bateau. Le chariot enlève la benne nouvellement chargée et la conduit automatiquement soit à la soute à charbon, soit au dépôt de chaux où le vidage s'effectue de même.

Cette installation a donc permis de faire l'économie d'une grue qui aurait coûté d'autant plus cher qu'elle aurait exigé d'importants travaux de fondation. Ce mode de transport, en outre, évite tout rechargement de la pierre calcaire et a pour effet de la ménager, ce qui est important pour la marche du four à chaux.

Ces derniers exemples montrent aussi comment les matières premières peuvent être réparties dans l'usine à l'aide des voies funiculaires et des voies suspendues électriques ; ils montrent également qu'on peut utiliser une seule et même installation pour le convoyage des matières les plus diverses, telles que le charbon, la pierre à chaux, etc...

Une importante installation de voies suspendues électriques a été exécutée dans une fabrique de chaux à Copenhague. Cette usine ne compte pas moins de 5 voies différentes : la première sert à décharger les bateaux à l'aide d'un chariot automoteur qui transporte la pierre à chaux dans un silo construit le long du rivage et au-dessus duquel est établie la voie.

La deuxième voie, desservie également par des chariots automoteurs, élève les bennes remplies et les décharge dans le dépôt de pierre à chaux. Pour empêcher les pierres de se briser dans la chute, on fait descendre la benne jusqu'au tas où elle est vidée par un déclanchement magnétique. Un seul homme suffit pour desservir l'installation ; il manœuvre les manettes à distance.

La troisième voie, qui forme un cercle fermé, a pour but de décharger le combustible des wagons de chemin de fer et de le convoyer au four circulaire de l'usine.

La quatrième voie évacue la chaux calcinée du four et la conduit au silo d'extinction, de là au broyeur à boulets, et finalement dans les wagons. Dans la cour de l'usine, cette voie est couverte pour mettre la chaux à l'abri de la pluie.

La cinquième voie sert au transport du combustible.

Dans d'autres cas, la voie suspendue électrique a eu à résoudre d'autres problèmes, notamment celui des dénivellations.

Comme cette voie fonctionne par simple adhérence, elle ne peut vaincre que de faibles différences de niveau. Mais, il est très facile de combiner les voies suspendues électriques avec une voie funiculaire, en réduisant autant que possible les rampes, munissant les chariots automoteurs d'appareils d'accouplement qui permettent de les faire entraîner par un câble tracteur sur les sections où existent des rampes. L'accouplement et le découplement du chariot se font alors automatiquement.

D'un autre côté, la voie suspendue électrique peut être utilisée également comme voie funiculaire. Un exemple de ce genre nous est fourni par la voie aérienne installée à l'usine « Eternite ».

La carrière d'argile est reliée à l'usine par une voie funiculaire. Pour tenir compte des exigences compliquées de l'usine, on a transformé les chariots de la voie funiculaire pour les adapter à la voie suspendue électrique. Entre la carrière et l'usine ils fonctionnent comme chariots pour funiculaire et à l'usine ils effectuent les transbordements comme chariots automoteurs ; à cet effet, ils se découplent automatiquement du câble tracteur à l'entrée de l'usine et continuent leur parcours par voie électrique, le chariot recevant le courant d'un câble disposé à cet effet sur la voie. Suivant la position donnée à l'aiguillage, les chariots sont dirigés sur une des voies conduisant au hangar où ils viennent buter contre une borne et se vident automatiquement, ou bien ils traversent le hangar et se rendent dans les bâtiments de la fabrique et déversent la marne dans le broyeur.

Pour convoyer à l'usine la matière conservée dans le hangar, on a prévu un chariot à treuil électrique desservi par un seul ouvrier qui, en même temps, remplit la benne.

Ce chariot sert également pour décharger la pierre calcaire des wagons du chemin de fer.

A cet effet, la voie électrique suspendue se prolonge jusqu'au-dessus des rails du chemin de fer, ce qui permet de faire plonger la benne dans le wagon et de la remplir.

Comme nous le verrons plus loin, le convoyage des produits fabriqués à l'intérieur de l'usine s'effectue, soit à l'aide de courroies de transport en treillis de métal ou en caoutchouc et balata, guidées sur des galets qui leur donnent une position légèrement concave ; le transport s'effectue ainsi d'une manière très uniforme sans secousses et sans dégagement de poussière. Mais, com-

me ces courroies s'usent rapidement et exigent d'ailleurs une force motrice assez grande, on les remplace parfois par des transporteurs automatiques à godets.

Le mode de construction adopté en dernier lieu pour ces transporteurs s'écarte des usages généralement suivis : il ne comporte qu'une seule chaîne sur le côté de laquelle sont suspendus les godets. Ce système réalise une économie de force motrice et diminue l'usure des éléments de la chaîne ; en outre, il permet à celle-ci dè passer d'un plan à un autre à l'aide de guidages appropriés. Les bords des godets émergent les uns sur les autres, ce qui permet de les remplir sans le secours d'un dispositif spécial, à l'aide d'une simple goulotte de déversement. Leurs axes sont munis d'un système de graissage de longue durée, de sorte qu'ils peuvent fonctionner pendant plus de 6 mois avec leur provision de lubrifiant. Les godets se vident automatiquement sur le point voulu à l'aide d'un dispositif spécial amovible.

On trouve, en outre, dans les fabriques de ciment des vis transporteuses ; mais celles-ci ne se rencontrent généralement que dans les cas où les matières transportées doivent être en même temps mélangées.

Lorsque les produits achevés sont expédiés en sacs, le transport de ces derniers s'effectue économiquement à l'aide d'une voie suspendue électrique.

Si maintenant nous jetons un coup d'œil sur les moyens de transport employés à l'intérieur de l'usine (voir plus loin), nous sommes obligés de convenir que les voies suspendues électriques sont un des meilleurs s'adaptant à toutes les conditions et fonctionnant avec une entière sécurité.



Pour le chargement des produits fabriqués, on se sert encore, en dehors des voies suspendues électriques, de dispositifs de garage qui sont employés également pour le déchargement des wagons.

Dans ce but, on avait employé tout d'abord la traction animale, ensuite des dispositifs de garage actionnés par l'électricité et enfin des treuils fixes avec câble. Toutes ces constructions ont été supplantées en dernier lieu par le câble sans fin en acier, guidé sur des galets et actionné d'une manière continue par un point

central. Ce câble étant installé à côté de la voie, il suffit d'y atteler les wagons à garer et de les conduire sur le point voulu. Ce système s'est répandu très rapidement, parce qu'il est beaucoup plus simple et meilleur marché que la traction animale ou la traction par locmotive, plus rapide et plus facile à surveiller que le treuil électrique, et qu'il ne donne lieu à des accidents que d'une manière tout à fait exceptionnelle. Il est clair qu'on peut garer de la même manière des trains entiers aussi bien que des wagons isolés. Sur chaque point du câble on a toujours de la force disponible pour le garage, ce qui permet de travailler sur plusieurs points à la fois. On peut de même amener dans le circuit de l'installation des wagons faisant partie d'autres trains, placés sur des points inaccessibles à une locomotive. Les frais d'installation sont relativement faibles; il en est de même des frais d'exploitation, car n'importe quel ouvrier peut y être occupé; enfin, ce système ne consomme de force motrice qu'autant qu'on s'en sert, tandis qu'une locomotive doit rester allumée toute la journée.

Une dernière question concernant le convoyage des matières dans les fabriques de ciment est celle du transport du charbon aux chaudières et aux fours à cuire le ciment.

Comme nous l'avons déjà fait observer plus haut, les voies suspendues électriques sont employées avantageusement dans ce but. On en trouve un exemple dans la sucrerie de Châlon-sur-Saône et dans l'usine d'élévation d'eau de Choisy-le-Roi. Dans ces installations la voie suspendue électrique travaille d'une manière absolument automatique, prenant le charbon dans les péniches ou dans les wagons de chemin de fer et le conduisant dans les soutes installées au-dessus des chaudières. Le chargement des bennes s'effectue alors au moyen de trémies spéciales, ou bien les bennes sont munies d'un treuil automoteur. La voie suspendue électrique présente ici cet avantage précieux de pouvoir passer à volonté par-dessus les maisons, les rues ou les terrains appartenant à des tiers, en un mot de s'adapter aux conditions topographiques les plus difficiles, pour amener le combustible du dépôt où il se trouve jusqu'à la chaufferie. Il s'ensuit que le directeur de l'usine n'a pas à se préoccuper de ce travail et qu'il peut consacrer tous ses soins à la bonne marche de l'entreprise.

Lorsque les conditions locales s'y prêtent, le convoyage du charbon à la chaufferie peut se faire très bien à l'aide de la chaîne

à godets monorail, qui peut être construite pour des rendements d'importance variable et est d'un fonctionnement sûr. Les installations de ce genre permettent de réaliser de sérieuses économies de salaires et affranchissent l'usine du bon vouloir des ouvriers.

En ce qui concerne le coût des installations de ce genre, il résulte d'évaluations tirées de la pratique que les voies suspendues électriques sont les plus avantageuses quand il s'agit de courtes distances à franchir, par conséquent pour les transports à l'intérieur de l'usine ou dans les situations topographiques difficiles, tandis que les voies funiculaires conviennent plus spécialement pour les convoyages à grande distance et sur un plan linéaire simple.

La chose est facile à comprendre : le coût des stations extrêmes de la voie funiculaire reste le même quelle que soit la longueur de la voie, de sorte que les frais augmentent dans une mesure relativement faible avec la longueur, tandis que pour la voie suspendue électrique, qui comporte des rails fixes et doit être soutenue par un certain ombre de consoles, les frais augmentent avec la longueur de la ligne, car chaque chariot comporte des parties mécaniques et électriques qui le mettent à un prix plus élevé que le chariot de la voie funiculaire. Or, plus la voie est longue, plus augmente le nombre des chariots qui la parcourent pour effectuer les transports, et par conséquent aussi le coût d'installation.

Il est clair que les conditions peuvent changer lorsqu'il se présente des dénivellations ou des complications dans l'établissement de la voie; chaque cas particulier comporte sa solution propre, qui ne peut être trouvée que par un spécialiste expérimenté.

Pour le déchargement des bateaux, on peut se demander quel serait le coût d'établissement de la voie électrique suspendue à chariots automoteurs et d'une grue à benne-drague combinée avec une voie suspendue à chariots simples sans automoteur. Ici encore la solution devra être cherchée suivant le rendement à obtenir dans chaque cas particulier.

Dans les installations peu importantes où il ne s'agit que de convoyer les matières sur une distance de 200 m. par exemple, sans transbordement intermédiaire, la voie électrique à chariots automoteurs sera la plus avantageuse lorsque les masses à transporter annuellement sont peu considérables; dans le cas contrai-

re, il est plus avantageux d'installer une grue combinée avec une simple voie électrique.

La raison en est facile à comprendre, car il est clair que la voie électrique à chariot automoteur déterminera des frais d'exploitation plus importants, par suite de la main-d'œuvre nécessaire au remplissage des bennes, que l'emploi d'une grue de déchargement à benne-drague; cependant la différence est peu considérable.

Quoiqu'il en soit, les frais de transport occasionnés par ces sortes d'installations sont beaucoup moins élevés que ceux causés par le travail à la main et l'emploi de wagonnets actionnés par des hommes, à tel point que dans beaucoup de cas l'installation est complètement amortie au bout de 1-2 ans rien que par les économies de salaire qui en résultent.

Dans d'autres cas, surtout dans ceux où la voie n'est que faiblement utilisée, il sera peut-être difficile de réaliser des économies de salaires. Il s'est même rencontré un cas où les frais de convoyage ont été les mêmes après l'installation d'un système de transport qu'auparavant où tout le travail se faisait à la main. Malgré cela, les directeurs de l'usine en question ne voudraient renoncer à aucun prix à leurs installations de convoyage automatique pour revenir au travail purement manuel, car ils sont trop heureux d'avoir pu, au prix de ces installations, se débarrasser des ennuis que leur avaient causés auparavant les difficultés avec les ouvriers; ils sont avant tout à l'abri des grèves et conservent ainsi toute leur liberté d'esprit pour la direction technique et commerciale de l'usine, laquelle est en somme la seule affaire importante pour eux.

Au point de vue du convoyage des matières premières et des produits fabriqués, une usine moderne doit fonctionner en quelque sorte automatiquement comme une grande machine; et de même qu'on calcule le rendement d'une machine, de même on peut calculer d'avance le travail qu'on peut attendre d'un système automatique de transport, et en déduire le renchérissement qui en résulte pour les matières premières et le produit fabriqué.

Dans les conditions actuelles et en présence de la fédération universelle des forces ouvrières, la nécessité s'impose de supprimer dans la mesure du possible la main-d'œuvre dans la marche d'une usine, et de confier les quelques postes exigés par le fonc-

tionnement automatique de l'usine, non à des ouvriers, mais à des employés.

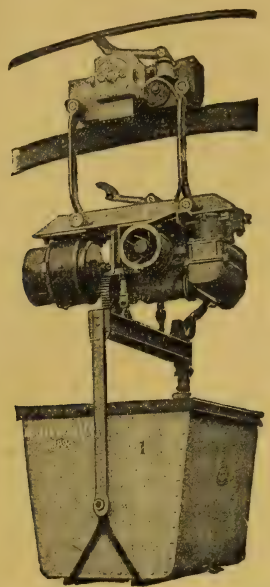


Fig. 123 *bis*. — Charriot électrique à montée et descente automatiques.

En supposant même que dans ce cas le fonctionnement de l'usine et des systèmes de transport revienne plus cher que par l'emploi de la main-d'œuvre, on sera toujours sûr d'être à l'abri des grèves et garanti contre les arrêts de fabrication pour faits de cette nature. Ce sont là des avantages inappréciables; chaque fabricant doit y réfléchir et s'efforcer de mettre sa fabrication en harmonie avec les progrès de la technique moderne et de l'affranchir de la tyrannie des gréviculteurs.

CHAPITRE X

APPAREILS AUXILIAIRES DE TRANSPORT

ÉLÉVATEURS

Nous en arrivons maintenant aux appareils auxiliaires qui servent au transport des matières premières, des produits intermédiaires et des produits achevés dans l'intérieur de la fabrique de ciment.

Pour élever les matières on se sert d'élévateurs à godets, d'élévateurs basculants et d'élévateurs à câble.

Elévateurs à godets. — L'élévateur à godets constitue un des moyens de transport les plus importants de notre époque : il sert à élever les matières les plus diverses et de toutes les grosseurs depuis celle du poing jusqu'à celle de la farine. Les godets sont généralement en tôle d'acier à bords renforcés. Ils sont fixés au moyens de cavaliers en fer forgé sur deux chaînes parallèles dites de navire, à mailles courtes, résistantes, courant au haut et au bas sur des tambours, pouvant être construites en la forme sans fin ou à extrémités libres. Chaque élévateur à godets est muni à sa partie inférieure d'un dispositif de tension automatique qui compense tout allongement des chaînes.

Les élévateurs à godets sont ordinairement enfermés dans une gaîne hermétique en tôle qui s'oppose à tout dégagement de poussière. Cette gaîne peut aussi être en bois.

La cuvette inférieure de l'élévateur à godets, qui reçoit également la matière à élever, est munie de portes latérales pour le nettoyage. Les élévateurs dont le pied se trouve au-dessus du sol peu-

vent être munis d'un clapet de fond permettant de vider la cuvette en vue de son nettoyage. On peut, en outre, disposer sur certains points facilement accessibles des regards munis de clapets qui permettent de se rendre compte du remplissage et de la marche des godets.

Les élévateurs de petites dimensions sont actionnés directement par poulie à courroie agissant sur le prolongement de l'axe du tambour supérieur; ceux de grandes dimensions sont actionnés au moyen de roues dentées. On leur donne généralement une position verticale; dans les cas spéciaux ils peuvent aussi être installés en position inclinée.

La figure 124 représente un élévateur à godets des Ateliers d'Arlod : la largeur des godets varie de 150 à 500 mm. Un appareil à godets de 300 mm. de largeur peut transporter environ 6.000 litres à l'heure à une hauteur de 10 m. avec une force motrice de 2,5 HP.

Lorsqu'on élève de la matière en gros grumeaux, son arrivée dans la cuvette doit se faire de telle sorte que les godets aillent à sa rencontre; dans ce cas, le point de déversement de la matière se trouve toujours sur le côté opposé à celui de l'arrivée. Lorsque la matière est à l'état de sablettes ou de farine, l'entrée et la sortie peuvent se trouver du même côté sans aucun inconvénient.

L'élévateur basculant sert à élever dans les étages supérieurs ou à descendre les briquettes de ciment brut fraîchement pressées. Les godets y sont remplacés par des planches suspendues entre deux chaînes et conservent leur position horizontale même en franchissant les poulies supérieures.

Monte-charges. — Pour élever des charges lourdes, telles que des wagonnets chargés de matières premières ou de clinker, ou des chariots à étages garnis de briquettes de matière séchée, on se sert de monte-charges : on place alors le fardeau sur la plate-forme du monte-charge et on élève le tout au moyen d'un treuil. Il est clair que la plate-forme doit avoir des dimensions en rapport avec les récipients qu'il s'agit d'élever. Dans les constructions soignées, le monte-charge est muni d'un dispositif d'arrêt automatique qui fonctionne en cas de rupture du câble, de la chaîne ou du ruban métallique de suspension de la plate-forme. Celle-ci se meut dans une cage

en bois ou en fer dont les montants servent en même temps à la guider dans sa marche. Les baies de chargement et de déchargement de la cage sont munies de portes qui sont ouvertes et fermées par le monte-charge, ce qui rend l'accès de la cage impossible par le bas lorsqu'il est en marche et empêche de tomber dans la cage par le haut.

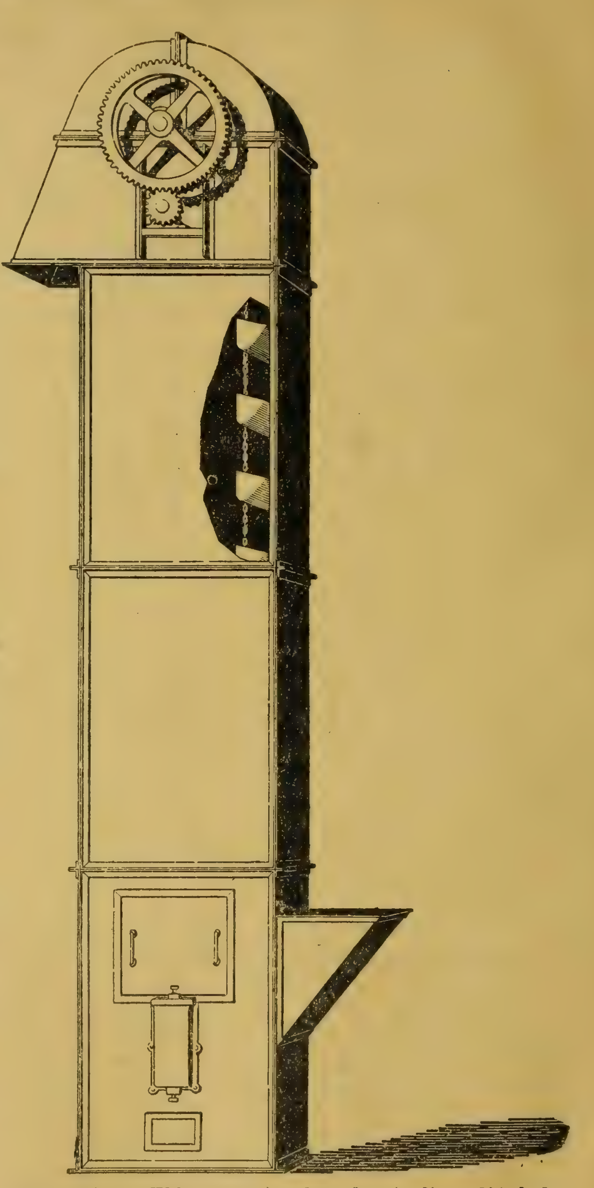


Fig. 124. — Elévateur à godets des Ateliers d'Arlod

Les monte-charges sont généralement construits à deux plate-formes, même lorsqu'une seule pourrait suffire à la rigueur, parce que le rendement de l'installation est alors double, tandis que le treuil ou la force nécessaire est sensiblement la même. Le treuil à enroulement doit être actionné d'une manière ininterrompue par une poulie; il est monté sur la même plaque de fondation que les poulies à courroie. Les tambours sur lesquels s'enroulent les câbles sont actionnés par une courroie droite et une courroie croisée par l'intermédiaire d'une hélice en acier et d'une roue hélicoïdale en cuivre. Les tambours sont mu-

nis de rainures destinées à l'enroulement. L'hélice et la roue hélicoïdale tournent dans un bain d'huile destiné à augmenter leur effet utile et à diminuer l'usure de ces organes. La pression axiale de l'hélice est supportée par un collet à roulement sur billes. Le treuil est, en outre, muni d'un puissant frein à sabot et d'un embrayage hélicoïdal qui permet de diriger aisément la marche de l appareil. Le treuil s'arrête automatiquement lorsque la charge arrive à sa limite d'élévation.

Dans les cas très fréquents où la transmission de la force par courroies, par câbles de chanvre ou par câbles métalliques produirait trop de complications, il serait très facile d'y remédier en adoptant la transmission électrique.

La construction du treuil est en tout smblable, quant au reste, à celle du treuil décrit plus haut; il suffit de munir le moteur d'un dispositif de démarrage et de renversement de la marche.

Pour élever de l'argile, de la boue ressuyée et des matières analogues sur un plan incliné, on se sert avantageusement d'un transporteur composé d'un pont en tôle ondulée monté sur deux chaînes tournant autour de deux poulies. Le pont en tôle peut être remplacé par n'importe quel autre élément de transport approprié à la nature des matières à élever. Le transport des matières premières après malaxage s'effectue le mieux à l'aide d'une sangle en fil métallique tressée d'une manière spéciale et roulant sur des galets lisses; ce système donne toute satisfaction.

Transports sur plan horizontal. — Pour transporter sur un plan horizontal des produits intermédiaires ou des produits ache-

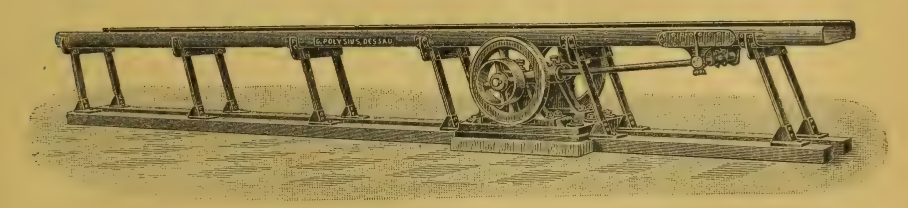


Fig. 125. — Transporteur à secousses

vés, on dispose de différents moyens mécaniques dont il s'agit seulement de choisir le plus convenable pour le but qu'on veut atteindre. S'il s'agit, par exemple, de transporter des matières en gros morceaux, on se servira d'un transporteur à secousses. Cette machine se compose (fig. 125) d'une rigole ouverte dont la largeur et la profondeur varient suivant la nature de la matière

à transporter; celle-ci y est amenée d'une manière uniforme et transportée lentement à l'extrémité opposée, par l'action des secousses imprimées à la goutière. La machine est fixée sur une plaque de fondation et actionnée au moyen d'un excentrique par une poulie qui fait 250 tours à la minute. La gouttière est placée sur un certain nombre de supports élastiques. La force motrice nécessaire est d'environ 2 chx pour transporter par heure 10.000 kg. de matières sur une distance de 10 m.

Le transporteur à secousses installé dans l'usine de M. Langlois à Saint-Léger (Nièvre) a une longueur de 24 m. et une largeur de canal de 40 cm.; il transporte par heure 7 tonnes de laitier granulé.

Dans un autre système de transporteur à secousses, les ressorts sont remplacés par des galets roulant sur des rails. Ce système n'utilise que la force vive de la matière sans la soulever : celle-ci avance donc en masse compacte et sans dégager de poussière. Cet appareil est de construction fort simple, il fournit un bon rendement et n'exige que très peu de force motrice : 60 à 80 tours par minute, tandis que l'appareil à ressort en demande 250 à 300. Il est construit par les Ateliers d'Arlod.

Parmi les moyens de transport pour matières en gros morceaux, il convient de citer encore le transporteur à chaîne. Il se compose d'une rigole fixe dans laquelle se meuvent des palettes montées sur une ou deux chaînes, qui poussent devant elles vers une ouverture de sortie les matières chargées dans la rigole. Ce système a été modifié dans ces derniers temps : on a muni les palettes de galets roulant sur des rails placés de chaque côté de la rigole.

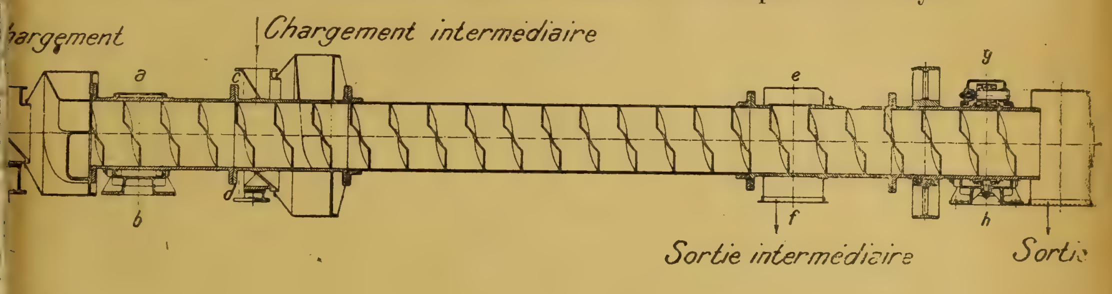
Un des plus anciens systèmes de transport sur la ligne horizontale pour matières à l'état de sablettes ou de poudre est la vis transporteuse. La partie active de ce système est une vis convenablement fixée dans une auge; en tournant sur elle-même elle charrie la matière dans la direction axiale et la pousse vers l'ouverture de sortie. Pour empêcher la matière de s'accumuler, la vis ne doit pas pénétrer tout à fait jusqu'à la porte de sortie, sinon il est nécessaire de lui donner un mouvement opposé dans les dernières spires.

Suivant sa longueur, l'arbre de la vis est formé d'un ou de plusieurs tuyaux d'acier assemblés au moyen de pivots fixés par des rivets. Les coussinets extrêmes de l'arbre sont disposés dans les

parois latérales de l'auge. Les arbres de grande longueur reposent en outre dans des coussinets qui sont, à de certaines distances, suspendus à l'intérieur de l'auge et peuvent être graissés de l'extérieur. La vis est généralement en tôle d'acier; elle n'est construite en fonte durcie que dans certains cas particuliers.

Le diamètre des spires varie, suivant les quantités de matière à transporter, entre 200 et 600 mm. La longueur maxima d'une vis est de 60 m. Pour éviter l'étranglement de l'arbre, les vis d'une certaine longueur doivent être actionnées par les deux côtés.

Quand il s'agit de transporter des matières en grumeaux chaudes, ou qui ne doivent pas venir en contact avec le lubrifiant des coussinets, on se sert d'une vis transporteuse à roulement, représentée par les figures 126 à 132. Celle-ci se compose d'un tuyau



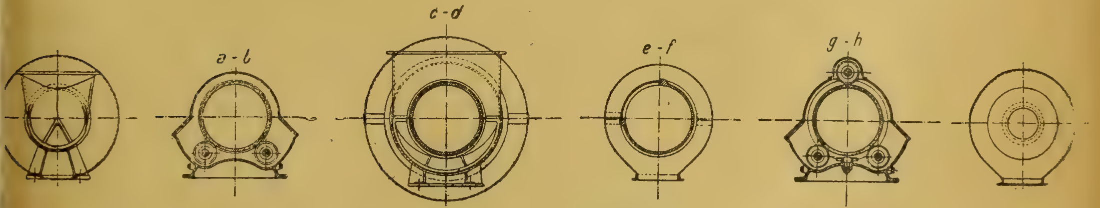


FIG. 126 à 132. — Vis transporteuse à roulement

tournant sur lui-même, dans l'intérieur duquel sont fixées des palettes en forme d'hélice qui, sous l'influence du mouvement de rotation, transportent la matière d'une extrémité à l'autre du tuyau. A cet effet, celui-ci peut êre muni d'ouvertures de chargement et de déchargement, dont la disposition est indiquée sur les gravures.

La vis à roulement peut être construite à un diamètre de 200 à 400 mm. et pour des rendements horaires allant de 1 à 16 m³. La

force motrice nécessaire est de 1 à 2 HP pour une longueur de transport de 20 m.

L'auge est formée de forte tôle d'acier renforcée aux arêtes et aux joints par des cornières. Les deux parois latérales sont en fonte. Pour empêcher tout dégagement de poussière, l'auge est fermée par des couvercles en tôle. Elle repose généralement sur le plancher par des supports en fonte, ou bien elle est fixée au plafond par des étriers.

Les vis transporteuses sont livrées pour être commandées, suivant les conditions locales, par engrenage droit ou conique ou directement par poulie.

Pour le transport des matières à l'état de sablettes ou de farine fine sur un plan horizontal ou légèrement ascendant à une distance assez grande (d'environ 20 m.), on emploie souvent la courroie de transport. L'installation de ce système est très simple; il se compose d'une courroie très large analogue à celles de transmission et courant sur deux tambours dont l'un reçoit le mouvement de transmission; elle est soutenue dans son parcours par des galets. La matière à transporter est chargée sur la courroie sur un point quelconque de son parcours, elle est emportée sans secousses jusqu'à ce qu'elle rencontre une dispositif de déchargement fixe ou mobile qui la fait tomber de la courroie. Ce déchargement peut se faire sur n'importe quel point de son parcours. Un dispositif de déchargement souvent employé se compose d'un petit chariot roulant sur galets sur lequel sont montés deux rouleaux, l'un supérieur, l'autre inférieur, d'une trémie de vidange à deux orifices de sortie et munie d'un clapet de vidange ; et enfin de pattes d'arrêt.

Pour fonctionner convenablement, la bande doit avoir avant tout une marche bien rectiligne, condition qui ne peut être réalisée qu'autant que la courroie soit faite de matière homogène et installée avec soin. La courroie, en outre, doit conserver une certaine rigidité de marche, ce que l'on obtient à l'aide de tendeurs agissant par leur propre poids ou réglés à l'aide d'une vis. Il faut éviter cependant de lui donner une tension exagérée qui la fatiguerait inutilement et abrégerait sa durée.

Les courroies de transport sont généralement en caoutchouc avec canevas en chanvre; celles en Balata font également un bon usage.

Dans certaines usines, les galets de support de la courroie ont une position inclinée en forme d'auge; on en obtient ainsi un rendement beaucoup plus élevé pour une même vitesse de parcours, mais les flexions et les redressements alternatifs de la courroie sur l'horizontale présentent l'inconvénient de l'user plus rapidement.

Somme toute, le transport par courroie présente sur les autres systèmes des avantages incontestables : faible consommation de force motrice, peu de frais d'entretien et marche silencieuse excluant tout dégagement de poussière.

A côté des avantages incontestables inhérents aux systèmes de transport que nous venons de décrire, ceux-ci présentent également certains inconvénients qui se font sentir d'une maière bien désagréable dans les grandes usines. En ce qui concerne d'abord la vis transporteuse, il est difficile d'empêcher absolument la poussière de pénétrer dans les coussinets intérieurs, d'où résulte une usure rapide de ces organes; en outre, la vis est sujette à des accrocs, en ce sens que la matière vient s'accumuler près des coussinets par suite de la solution de continuité que présentent nécessairement les spires sur ces points. Les courroies de transport à leur tour, quand elles sont de mauvaise qualité ou mal installées, s'inclinent d'un côté et déversent la matière sur le sol.

Appareils de réglage de l'alimentation. — Parmi les moyens de transport employés dans les fabriques de ciment, il convient de citer encore les dispositifs de chargement dont on se sert souvent pour puiser les matières dans les réservoirs et les introduire d'une manière uniforme dans les appareils broyeurs à travail continu, tels que les moulins à boulets, les moulins à meules verticales ou horizontales, etc. Comme l'uniformité d'alimentation d'un broyeur est une condition indispensable pour en obtenir de bons rendements, pour le faire fonctionner sans bruit et avec le minimum de dépense de force motrice, il est facile de comprendre sans plus que les constructeurs ont dû apporter également tous leurs soins à cette partie de l'outillage et qu'il en est résulté toute une série de dispositifs dont nous ne citerons que les plus marquants. Tous ces dispositifs ont cela de commun qu'ils permettent de régler exactement la quantité de matière entrant dans le broyeur sans qu'il soit nécessaire de faire varier la vitesse de la commande, et qu'ils peuvent être mis au point pendant la marche de l'appareil.

Comme appareil de chargement du concasseur, on emploie beaucoup la grille Briart (fig. 133 et 134). Cet appareil se compose d'une grille en fer plat ou en U a^1 a^2, suspendue et inclinée,

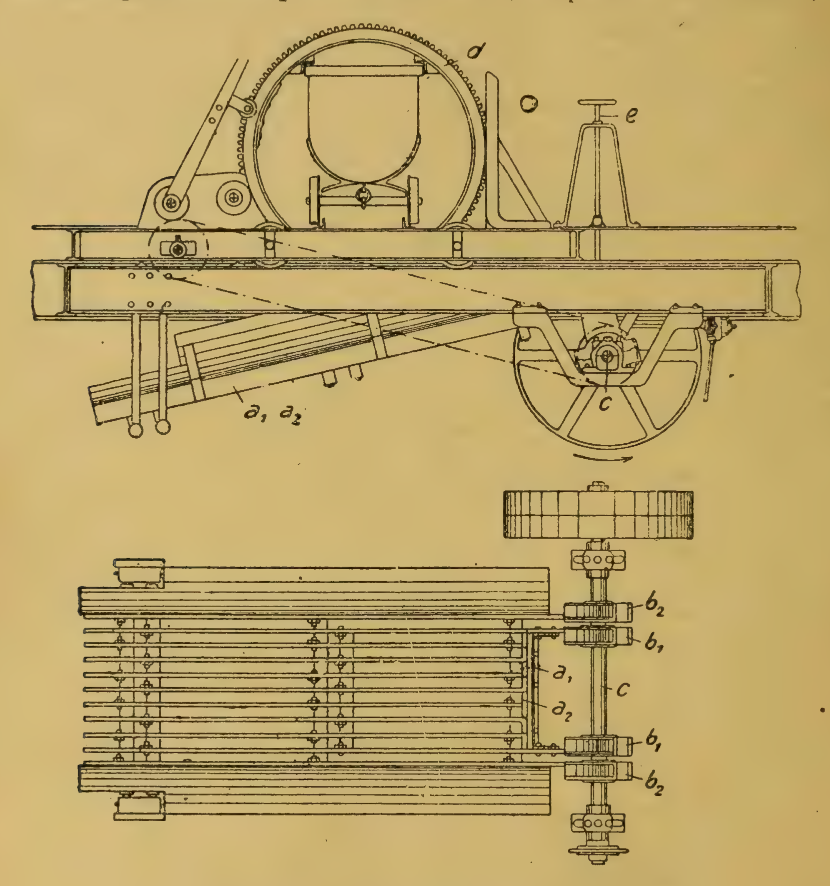


Fig. 133 et 134. — Grille Briart pour le chargement des concasseurs

dont les barreaux exécutent un mouvement de va et vient qui leur est imprimé par les tiges d'excentrique b^1 b^2 fixées sur l'arbre de commande : ce mouvement a pour effet de faire rouler les gros morceaux dans la trémie du concasseur, tandis que les menus fragments passent à travers la grille et sont réunis ensuite à la matière concassée. Si la matière est amenée sur la grille par des bennes supendues à une voie électrique et à basculement automatique, le concasseur peut être desservi avec le minimum possible

de main-d'œuvre; si elle est amenée par wagonnets, il suffit de basculer ceux-ci à la main ou à l'aide du wipper *d*.

Un autre appareil d'alimentation du concasseur est construit par les Ateliers d'Arlod et représenté par la figure 135. C'est un appareil très simple, soigneusement étudié, qui fonctionne à

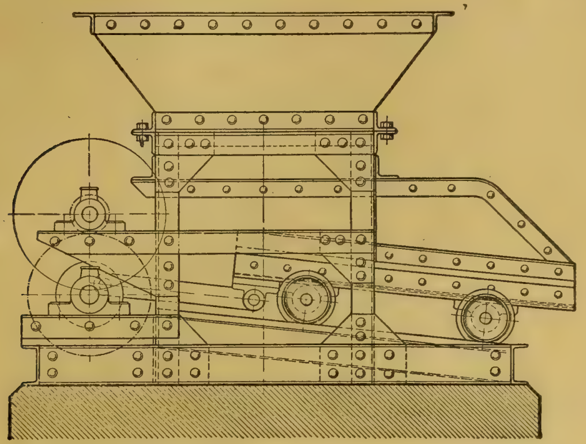


FIG. 135. — Appareil d'alimentation pour concasseurs (Ateliers d'Arlod)

l'entière satisfaction des intéressés. Les pierres qui sont amenées par Decauville ou par voie aérienne sont déversées dans une trémie qui le surmonte et distribuées par lui d'une façon constante et régulière dans les appareils de broyage. Il est réglable à volon-

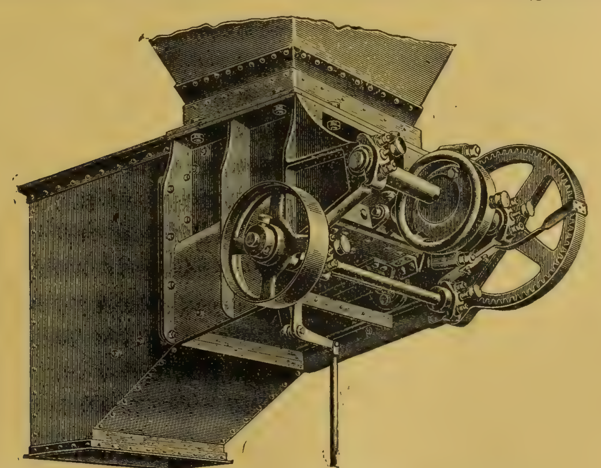


FIG. 136. — Chargeur automatique à excentrique

té et constitue également un excellent alimentateur pour les appareils de transport.

Le régulateur construit par la Société Krupp Grusonwerk (*fig.* 136) est employé pour l'introduction de morceaux pouvant atteindre la grosseur de 200 mm. ; il se compose d'un chariot mû par un excentrique, et qui, à chaque poussée, laisse échapper une certaine quantité de la matière à broyer.

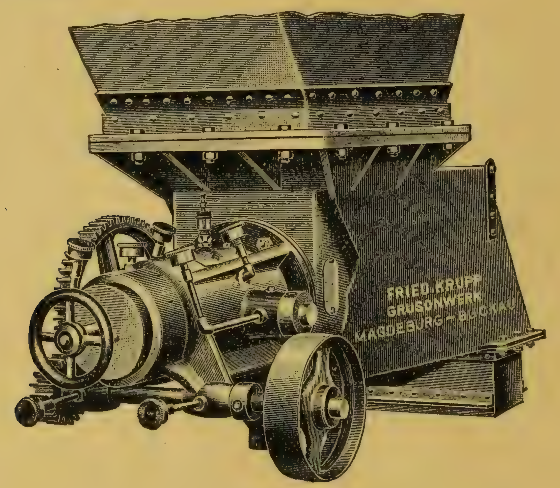


Fig. 137. — Chargeur automatique à piston

La figure 137 représente un appareil chargeur à piston, qui fournit au broyeur des morceaux pouvant atteindre une grosseur de 120 mm. Il se compose d'un piston placé dans une cage en fonte et commandé par un engrenage et un excentrique ; à chaque mouvement il décharge une certaine quantité de matière. On le règle à l'aide d'une roue à main.

L'appareil chargeur à secousses convient particulièrement quand il s'agit d'alimenter les broyeurs de matières à l'état de sablettes. La quantité de matière à charger est réglée par un secoueur et un tiroir.

CHAPITRE XI

APPAREILS DE DÉPOUSSIÉRAGE

Il y a peu d'industries qui dégagent autant de poussière que la fabrication du ciment. Il n'y a pas lieu de s'en étonner si l'on songe que les quantités de pierre à chaux, d'argile et de ciment cuit qui doivent être pulvérisées journellement sont très considérables, même dans les fabriques les moins importantes. Il y a 25 ans à peine on avait moins de sollicitude pour la santé et la vie des ouvriers ; le dégagement de poussière était considéré alors comme une chose toute naturelle et inévitable. Aussi, les vis transporteuses fermées pour le transport sur un plan horizontal étaient absolument inconnues : les élévateurs à godets déversaient leur contenu à même sur la plateforme du broyeur, et tous les produits pulvérulents étaient conduits d'un point de l'usine sur un autre à l'aide de brouettes. Aussi le dégagement de poussière y était tellement intense qu'on ne voyait pas à deux pas devant soi et qu'un homme en bonne santé ne pouvait y séjourner que pendant quelques minutes. Actuellement les conditions sont changées, et le temps est passé où l'unique moyen de se débarrasser de la poussière consistait à ouvrir les fenêtres.

Pour éliminer la poussière de l'air qui la véhicule, on installe des chambres à poussière et des filtres à poussière.

Les chambres à poussière sont des locaux dans lesquels on introduit le courant d'air chargé de poussière ; par suite de l'élargissement subit de sa section et de la diminution de vitesse qui en résulte, l'air précipite une partie de la poussière, et cette partie est d'autant plus grande que la vitesse de l'air a diminué davantage. Comme, cependant, cette vitesse ne peut être amenée à zéro, et que l'air, quelque faible que soit sa circulation, tient encore de

la poussière en suspension, il est clair que ce moyen ne permet d'éliminer qu'imparfaitement la poussière de l'air.

FILTRES A POUSSIÈRE

La question du dépoussiérage est mieux résolue par l'emploi des filtres à air. L'air chargé de poussière est aspiré à travers des filtres qui retiennent la poussière, tandis que l'air purifié sort par le côté opposé. A cet effet, on ne se contente jamais d'un seul filtre, mais on décompose la surface filtrante en un certain nombre d'éléments pour épurer une quantité donnée d'air. Suivant leur forme et leur disposition, on distingue les *filtres à poche* ou *à tuyaux* et les *filtres en étoile.*

a) *Les filtres à poches.* — Les filtres à poches consistent en une série de poches étroites, cylindriques, communiquant avec un ventilateur qui aspire au travers d'eux l'air chargé de poussière : celle-ci est alors retenue par la paroi intérieure des poches, tandis que l'air épuré est chassé au dehors. Les poches sont disposées par série de quatre ou de huit dans les compartiments d'une boîte ayant la forme d'une armoire, ouvertes en bas et fixées sur le fond de la boîte, fermées en haut par un couvercle en bois et suspendues à un levier à ressort dont l'extrémité inférieure est reliée à une roue à rochet. On nettoie les poches de temps en temps en y envoyant un courant d'air pur du dehors en dedans ; l'action épurante est soutenue par le mouvement alternatif de traction et de relâchement produite par le rochet sur les poches. Celles-ci reprennent alors intégralement leur pouvoir filtrant.

Le nettoyage de chaque groupe de filtres se fait toutes les six à huit minutes. Il n'y a jamais d'interruption dans le fonctionnement de l'ensemble de l'appareil, car celui-ci se compose généralement de deux ou d'un plus grand nombre de systèmes, dont un seul est constamment en nettoyage.

La poussière réunie dans l'appareil tombe dans la trémie qui se trouve sous le filtre, et est enlevée d'une manière ininterrompue par une vis ou par tout autre dispositif et utilisée, s'il y a lieu.

Grâce à ces qualités, le filtre a air a été adopté par un grand nombre d'usines.

Une installation de dépoussièrage au moyen des filtres à air aspiré fonctionne à l'usine de la maison Jolly, Pagès et C[ie], Albi (Tarn), pour la fabrication de la chaux marchande et du ciment de grappiers.

Le dépoussiérage de cette installation s'effectue à l'aide d'un collecteur à poussière à 12 tubes, et d'un ventilateur à air aspirant et refoulant, d'un diamètre d'ailes de 900 mm.

Le filtre et le ventilateur sont placés sous la toiture, et un canal général court sous le plancher de cet étage. Le collecteur a pour but de recevoir les tuyaux de raccord des différentes machines à dépoussiérer. Par ces tuyaux de raccord on fait donc communiquer toutes les machines avec le collecteur qui, à son tour, aboutit au filtre à poussière.

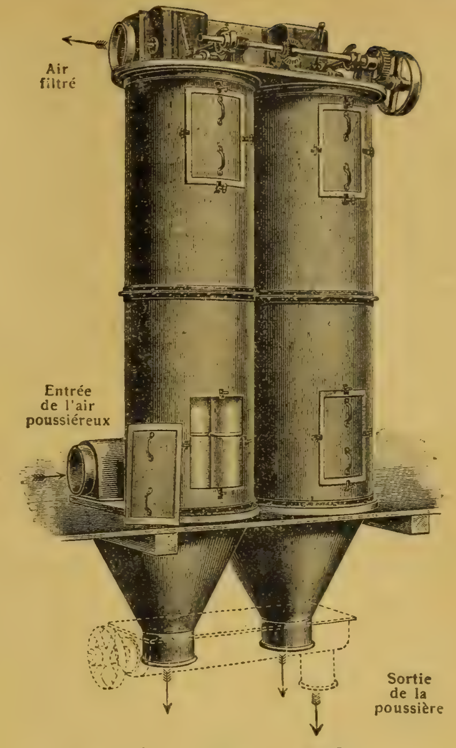


Fig. 138. — Filtre à poches

Un ventilateur, placé à côté du filtre, communique avec cet appareil par son tuyau d'aspiration et aspire l'air de l'intérieur de sa caisse, des tubes filtrants, du collecteur, des tuyaux de raccord ; c'est-à-dire qu'il produit un courant d'air saturé de poussières des différentes machines au filtre. L'air poussiéreux entre par l'ouverture inférieure des tuyaux filtrants, qui retiennent la poussière, tandis que l'air aspiré à travers les tubes, ainsi filtré et débarrassé de toute poussière, est refoulé au dehors par le ventilateur. Il n'y a donc presque aucune perte de poussière.

La partie la plus intéressante du filtre réside dans le mécanisme nettoyeur destiné à débarrasser périodiquement et automatiquement les tuyaux filtreurs de la poussière retenue, et cela sans interruption de marche.

Chaque paire de tubes, enfermée par les cloisons, forme un système séparé et isolé des autres, ainsi qu'on peut s'en rendre compte par l'examen des figures.

Pour chaque paire de tuyaux se trouve, dans les boîtes d'aspiration qu'on voit sous le mécanisme nettoyeur, un clapet dont la position détermine la direction du vent produit par l'aspiration du ventilateur.

Au moment précis où doit se faire le nettoyage d'une paire de tubes, le mécanisme nettoyeur change la position du clapet correspondant à cette paire, interrompant ainsi momentanément l'effet de l'aspiration. Pendant cette manœuvre, un passage s'ouvre et donne libre accès à l'air atmosphérique, qui entre dans la cabine des tubes filtrants en arrêt, avec plus ou moins de violence, selon le vide produit par le précédent travail du ventilateur, et qui pénètre ensuite à l'intérieur des manches par les pores des tissus.

Pendant cette opération, des cames tournant sur un arbre et déplacées automatiquement font plier les tuyaux en donnant une poussé à l'extrémité inférieure du levier coudé. Au moment où la came glisse du levier, un fort ressort, monté dans celui-ci, fait ressauter brusquement les tubes et les remet dans leur position normale. Ce mouvement, qui se renouvelle cinq ou six fois consécutives, suivant les besoins, débarrasse les tubes filtrants de la poussière dont ils sont chargés.

Dans l'installation des appareils de dépoussiérage il est nécessaire de se conformer à certaines règles que nous allons énumérer, et dont nous montrerons l'application par des exemples tirés de la pratique industrielle.

Tout d'abord il faut s'efforcer de diminuer autant que possible la formation de poussière, en entourant les machines d'où elle se dégage de préférence d'enveloppes hermétiquement fermées. Si l'on arrivait à enfermer ainsi les machines au point de rendre impossible tout dégagement de poussière, on n'aurait nullement besoin d'installer des filtres à poussière. En pratique cependant, la chose n'est guère possible, d'un côté parce que les enveloppes des machines ne conservent pas leur étanchéité, ensuite parce qu'on est obligé d'y laisser des ouvertures, telles que les trémies des concasseurs lorsque les matières sont amenées à pied d'œuvre par des ouvriers.

C'est pourquoi on cherche à obtenir dans ces sortes de machines une faible dilution d'air en les reliant au tuyau aspirant d'une chambre à poussière. Cette dilution doit être calculée de telle sorte

qu'elle suffise simplement à empêcher la poussière de se dégager par les ouvertures de la machine.

Le concassage et la mouture donnent lieu à un dégagement de chaleur dans les machines, de sorte que l'air chargé de poussière a une tendance à se dégager par le haut. Dans ces sortes de cas on devra utilisr le mouvement naturel de l'air et rattacher le tuyau aspirant à la partie supérieure de la machine.

Au point de jonction avec la machine, les tuyaux aspirants doivent être élargis en forme d'entonnoir afin que l'air de la machine s'y engage avec moins de rapidité et entraîne le moins possible de poussière. Chaque tuyau aspirant l'air dans une machine doit être muni d'un clapet qui permet de régler l'intensité du courant et d'interrompre au besoin la communication entre la machine et le ventilateur.

On évitera autant que possible les changements brusques de diamètre dans les tuyaux de ventilation. La vitesse de l'air doit être à peu près la même sur tous les points de son parcours, en tout cas assez grande pour que la poussière ne se dépose pas dans les tuyaux, mais soit entraînée dans le collecteur. On n'emploiera pas de conduites horizontales; si l'on ne peut faire autrement, il est nécessaire de munir les tuyaux horizontaux d'une vis transporteuse de construction légère.

Enfin, rappelons que pour fonctionner convenablement d'une manière permanente, les appareils de dépoussiérage de quelque système qu'ils soient, exigent une surveillance constante et doivent être maintenues en bon état.

Prenons comme installation typique celle qui a pour but d'évacuer la poussière dégagée par les broyeurs à boulets et les tubes broyeurs. Ces machines sont raccordées par un tuyau d'absorption avec le filtre à poussière, qui est installé dans un endroit chaud, de préférence contre la maçonnerie du tambour-séchoir, afin d'éviter les condensations qui détérioreraient le métal des filtres. L'air épuré dans le filtre et chargé de vapeur est évacué au dehors par un exhausteur. La poussière est naturellement retenue à l'état sec par les parois du filtre et évacuée à l'aide d'une hélice.

Les figures 139 à 141 représentent une installation de dépoussiérage des broyeurs à matières premières et à ciment. m^1, m^2, m^3 sont des broyeurs compound qui servent au broyage du ciment, les broyeurs m^1 et m^2 pouvant servir à volonté pour le broyage

du ciment ou des matières premières. L'installation des filtres à poussière se compose de deux sections *a* et *b* : la section *a* possède 2/3 de la surface filtrante totale, et la section *b* 1/3 de cette sur-

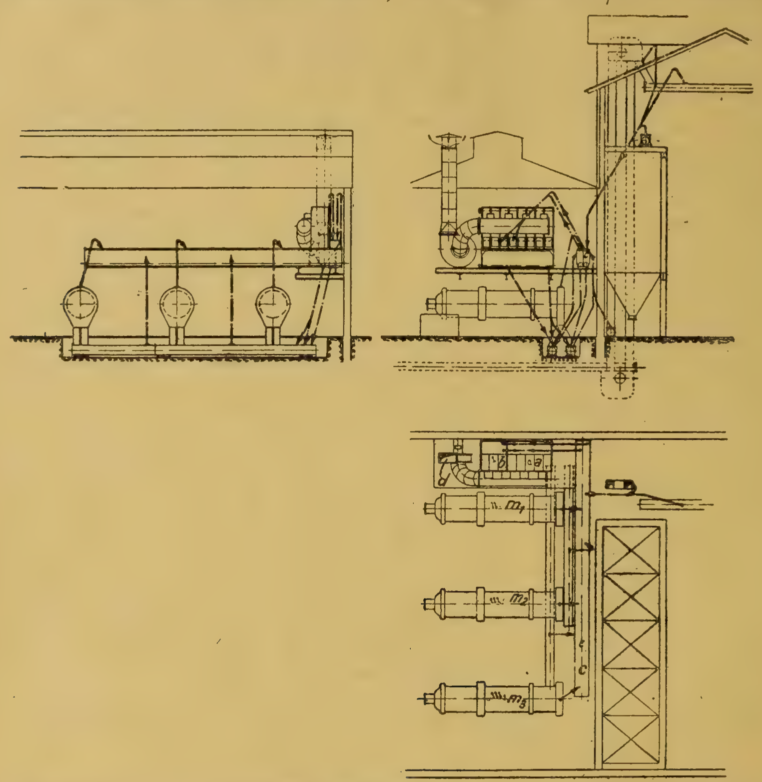


Fig. 139 à 141. — Vue d'une installation de dépoussiérage des appareils broyeurs

face. Le canal collectionneur *c* est également partagé en deux sections, dont l'une reçoit la poussière des matières premières, et l'autre la poussière de ciment. A cet effet, il est relié par des tuyaux d'absorption, d'une part avec les broyeurs des deux catégories, de l'autre avec les filtres; il suffit de manœuvrer un clapet pour établir la communication de l'ensemble avec la section corres pondante du collecteur.

Les autres appareils qui dégagent de la poussière, tels que les vis transporteuses, les élévateurs à godets, etc. sont également reliés aux filtres à poussière et au canal collecteur par des tuyaux d'absorption. La poussière qui se dépose dans les filtres est éva-

cuée dans la section correspondante de ce canal. L'installation de dépoussiérage est surmonté d'un exhausteur *d* qui évacue au dehors l'air épuré.

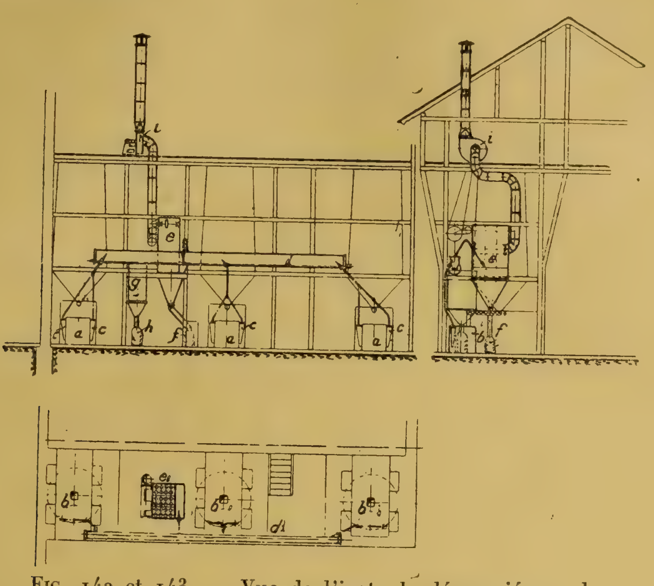


FIG. 142 et 143. — Vue de l'inst. de dépoussiérage de l'atelier d'ensachage

Les figures 142 et 143 représentent une installation de dépoussiérage de l'atelier d'ensachage, *a a a* sont des balances automatiques entourées d'enveloppes *b;* celles-ci sont ouvertes sur le devant pour le travail et portent sur chaque côté des ouvertures d'absorption *c*. Ces ouvertures communiquent au moyen de tuyaux et du canal collecteur *d*, avec le filtre *e* dans lequel se dépose

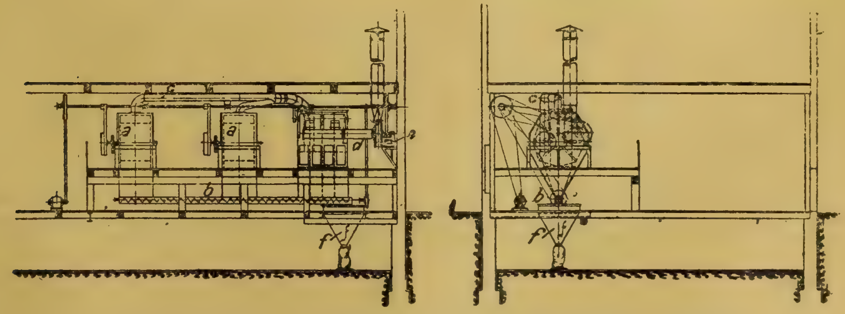


FIG. 144 et 145. — Installation de dépoussiérage de l'atelier de nettoyage des sacs

la poussière absorbée; la poussière est ensachée en *f*. La poussière qui se dépose dans le canal collecteur se rend dans le réservoir *g* et est ensachée de temps en temps en *h*. L'air épuré est évacué au dehors par l'exhausteur.

Les sacs de livraison du ciment exigent des nettoyages et des réparations fréquentes, et ces opérations donnent également lieu à un fort dégagement de poussière.

Les figures 144 et 145 donnent des vues d'une installation de dépoussiérage d'un établissement de nettoyage des sacs.

Les sacs séchés sont placés dans une machine à secouer *a* et celle-ci mise en mouvement. La grosse poussière qui se dégage dans cette opération tombe à travers les trémies des enveloppes dans l'auge à hélice *b*, tandis que la poussière fine est absorbée par des tuyaux *c* qui la conduisent dans le filtre *d* où elle se dépose. L'air épuré est évacué au-dehors par l'exhausteur *e*, tandis que la poussière des filtres tombe également dans l'auge de l'hélice *b*, d'où elle est évacuée dans le réservoir *b* et ensachée de temps en temps.

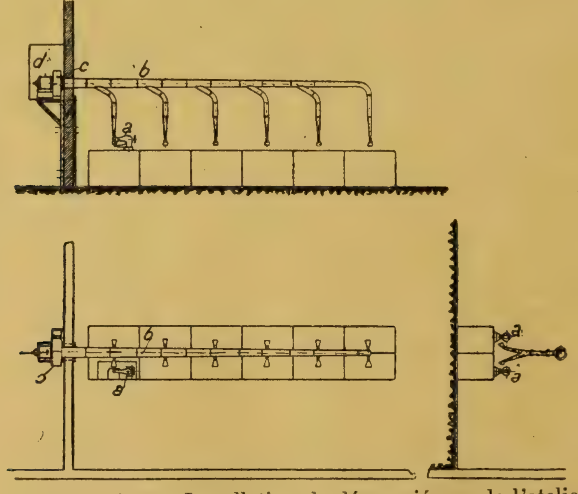


Fig. 146 et 147. — Installation de dépoussiérage de l'atelier de réparation des sacs

Lorsque les sacs sont nettoyés, ils sont transportés à l'atelier de réparation (fig. 146 et 147). Comme leur manipulation donne également lieu à un dégagement de poussière, on installe derrière les machines à coudre *a* des tuyaux d'absorption *b* qui com-

muniquent avec l'exhausteur *c*, qui dirige la poussière dans une chambre à poussière *d* ou l'envoie au dehors. L'air étant peu chargé de poussière, on peut se dispenser ici du filtre à air.

La dépense de force motrice des installations de dépoussiérage que nous venons de décrire est très faible; celle exigée par l'exhausteur varie suivant les quantités d'air à évacuer. En ce qui concerne la grandeur des surfaces filtrantes, elle varie dans chaque cas particulier suivant l'importance de l'usine; quoi qu'il en soit, il vaut toujours mieux les prendre trop grandes que trop petites.

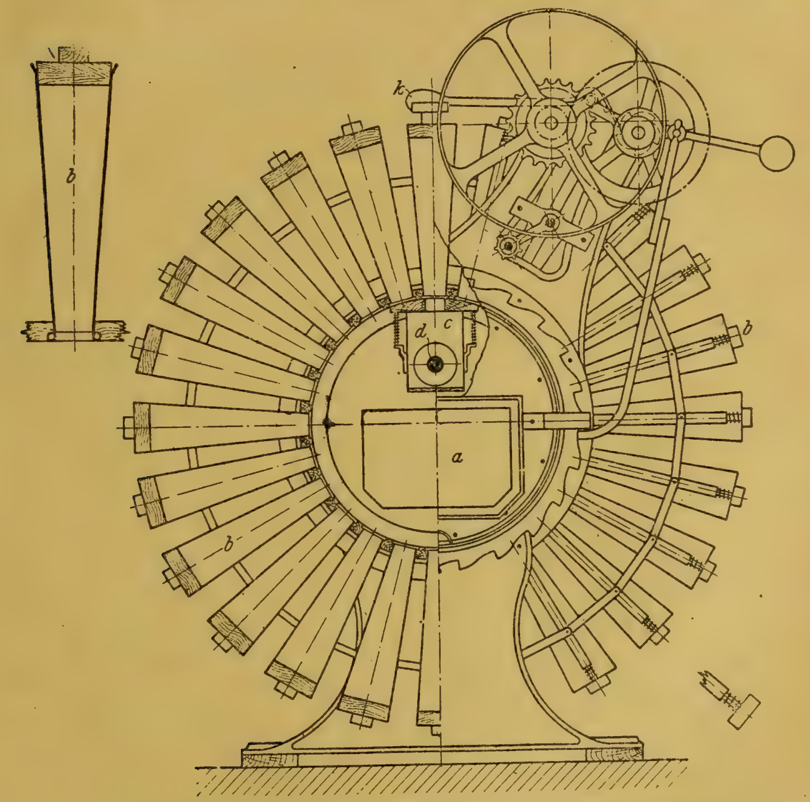


Fig. 148. — Filtre à air « Perfection ». — Vue en perspective

Mentionnons encore l'appareil Perfection, construit par la Prinz et Rau Mfg Co à Milwaukee et qui commence à concurrencer les systèmes des filtres à poche. Le collècteur de poussières Perfection est un filtre à pression ; il se compose (fig. 148 et 149) d'un certain nombre de cellules *b* disposées en forme de rayons autour

d'un tambour, confectionnées avec un tissu perméable à l'air, mais retenant la poussière. L'air chargé de poussière entre en *a* et grâce à un dispositif approprié, se répartit uniformément dans les différentes cellules. Le tambour est mis en mouvement à des intervalles déterminés, et vient alors placer chaque fois une série de cellules au-dessus d'un récipient *c* dans lequel elles laissent tomber la poussière dont elles sont chargées. Celle-ci est entraînée par une vis *d* qui l'évacue en *e*.

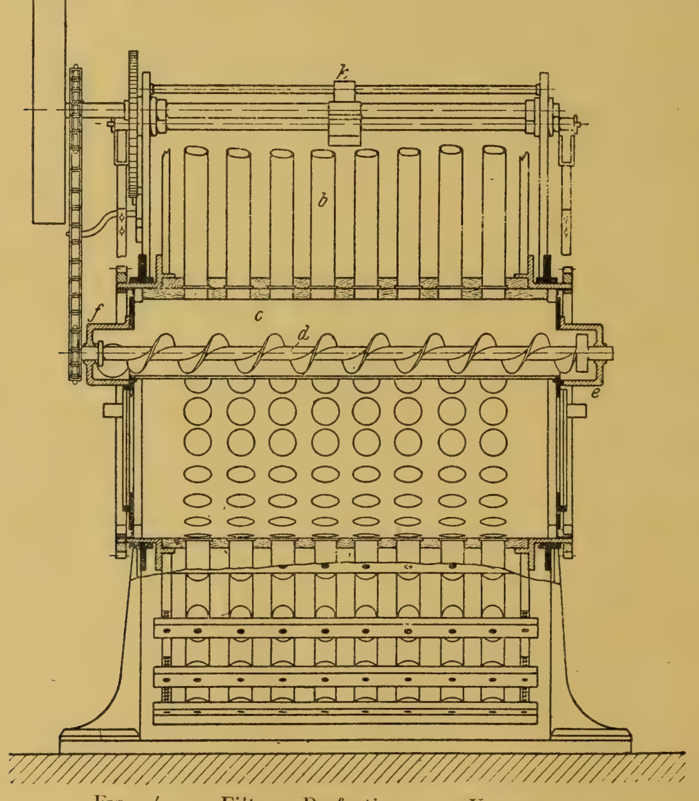


Fig. 149. — Filtre « Perfection ». — Vue en coupe

Pour nettoyer le filtre, on fait arriver de l'air extérieur par *f* dans le récipient *c* qui communique avec la conduite du ventilateur par un tuyau spécial. Lorsqu'on établit la communication, il se produit dans le récipient et dans les cellules qui y débouchent un vide qui fait un appel d'air de l'extérieur vers l'intérieur. Cet appel d'air est tellement énergique qu'il agite violemment les parois des cellules et en détache la poussière adhérente. En même

temps les cellules soumises au nettoyage sont ébranlées par des marteaux en caoutchouc *k* qui font ployer les ressorts tendeurs et produisent ainsi une violente agitation.

La *fig.* 150 montre un collecteur de poussières Perfection combiné avec deux broyeurs à boulets, où *a* est le tuyau faisant communiquer ces derniers avec le ventilateur *e*, *b* est le tuyau du contre-courant d'air, *c* la sortie de la poussière recueillie, *d* la poulie de commande du collecteur de poussière *p*, *h* le clapet régulateur et *kk* les moulins à boulets.

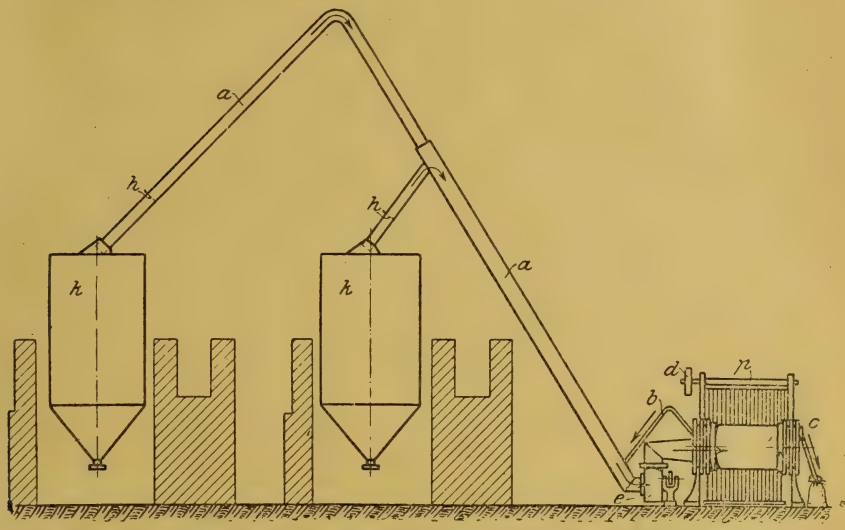


Fig. 150. — Collecteur de poussières combiné avec deux broyeurs à boulets

Elimination de la poussière par la force centrifuge. — La troisième méthode d'élimination de la poussière est basée sur l'emploi de la force centrifuge. Si l'on imprime un mouvement circulaire à une couche d'air chargée de poussière, les grains de poussière les plus lourds se rendent à la périphérie et s'y précipitent, tandis que les plus légers occupent le centre. Le collecteur de poussière « cyclone » est une application de ce principe. Il se compose d'un récipient conique en tôle, très évasé au sommet, dans lequel l'air chargé de poussière est injecté tangentiellement par un ventilateur. La poussière précipitée glisse vers l'ouverture de sortie par une spirale, tandis que l'air épuré se dégage par l'ouverture centrale du couvercle dans un tuyau qui le surmonte et l'évacue au dehors.

La combinaison du « cyclone » avec les pulvérisateurs pour abattre les dernières poussières qui se trouvent à l'état de fine division dans la vapeur d'eau a été installée avec succès dans de nombreuses usines.

Les constructeurs ont apporté au cyclone certains perfectionnements représentés dans les figures 151 et 152. L'air chargé de poussière entre en *a* dans la partie cylindrique de l'appareil et se dirige ensuite de haut en bas dans la direction indiquée par les lignes en pointillé : sous l'influence du mouvement tourbillonnaire, la poussière se dépose et sort par le bas de l'appareil, tandis que l'air remonte dans le cylindre *c* dans lequel sont disposées des ailettes d, d^1, d^2, d^3, en forme d'hélice, entourées d'un second cylindre *b* et surmontées d'une calotte *e*. Ces ailettes produisent un nouveau mouvement tourbillonnaire au-dessus du cylindre *c*; par suite, la poussière encore contenue dans l'air est précipitée contre le cylindre *b* et la calotte *e* et tombe de là dans le bas de l'appareil. On a ainsi une double épuration de l'air.

Le cyclone construit par Pfeiffer frères, constitue une combinaison ingénieuse de la force centrifuge et du principe des filtres à poches. Cet appareil se compose d'un récipient *a* dans lequel est disposé un second récipient *b*. Ce dernier est divisé en 6 chambres communiquant chacune par des ouvertures *d* à réglage automatique avec 3 poches filtrantes *e*. Dans le récipient *b* se trouve un troisième récipient *f* communiquant par des ouvertures *g* avec le récipient *b*, tandis que sa partie tubulaire *h* est reliée au tuyau aspirant du ventilateur. Le clapet *i* du récipient *b* et les clapets *k* du récipient *f* sont fixés ensemble solidairement par une tige *l*, de telle sorte que l'ouverture du clapet *i* a pour effet de fermer les clapets *g* et inversement. La manœuvre des clapets se fait au moyen d'un levier *m*.

Le dépoussiérage s'effectue comme suit :

L'air chargé de poussière est injecté, au moyen d'un exhausteur, par le tronçon tangentiel (non porté sur la figure) dans le récipient *a* où il est dépouillé des particules les plus grosses par l'action centrifuge. Après cette première épuration, l'air passe par les ouvertures *d* dans les 5 chambres *c* (la 6e est fermée chaque fois) et passe de là dans $5 \times 3 = 15$ poches filtrantes où il est dépouillé des dernières traces de poussière. Celle-ci sort du filtre en *p*. A ce moment la 6e chambre et les trois poches filtrantes qui y

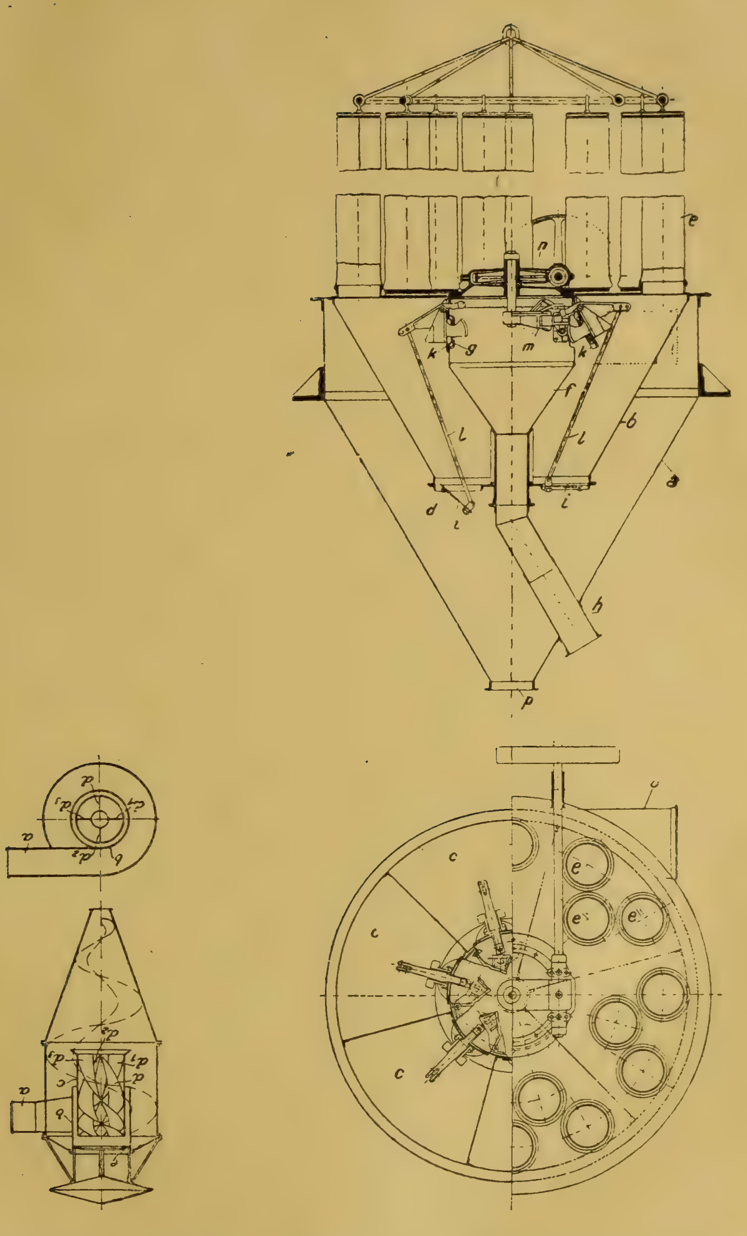


Fig. 151 et 152. — Cyclone. Elévation et plan

Fig. 153 et 154. — Filtre cyclone à nettoyage par le vide (Pfeiffer Frères)

correspondent sont mises en communication avec l'intérieur du récipient *f*, de telle sorte que le courant d'air produit par l'aspiration de l'exhausteur passe dans une direction opposée par les pores des poches filtrantes et les rouvre doucement, sans le moindre choc.

L'épuration de l'air en deux phases est ainsi parfaite, et les poches filtrantes ont une durée très grande, grâce à l'absence de tout système de battage ou d'ébranlement.

*
* *

Précipitation des poussières au moyen d'un jet d'eau finement pulvérisé. — L'élimination de la poussière par le « cyclone » n'est pas parfaite. Mais, l'empoi de cet appareil est tout indiqué dans les cas où l'air saturé de poussière est en même temps chaud et humide, et où les filtres ne tarderaient pas à s'encrasser et se détériorer.

Ce cas se présente tout spécialement lorsque le séchage des matières premières du ciment s'effectue dans des séchoirs tournants à l'aide d'un fort courant d'air et lorsque les matières ont été broyées à une finesse assez grande. Si elles sont peu humides et ont une forte tendance à dégager de la poussière, celle-ci peut devenir très gênante malgré l'installation du « cyclone » et d'une chambre à poussière. La vapeur d'eau qui se dégage des cheminées du séchoir et du «cyclone » est alors tellement chargée de poussière qu'elle peut devenir très gênante non seulement pour les ouvriers de l'usine, mais encore pour le voisinage. Il y a un moyen très simple et peu coûteux de remédier à cet inconvénient : il consiste dans l'emploi d'eau finement pulvérisée.

Ce procédé est appliqué avantageusement lorsqu'il s'agit d'éliminer de grandes quantités de poussière fine véhiculée par de l'air humide, dans les cas par conséquent où l'humidité de l'air s'oppose à l'emploi des poches filtrantes et où la finesse et la légèreté de la poussière excluent l'utilisation du cyclone. Ce cas se présente notamment dans le séchage artificiel des matières premières du ciment, opération dans laquelle les cheminées de dégagement qui se trouvent au-dessus des tambours-séchoirs ont à évacuer de grandes quantités de poussière fine en même temps que de la buée. En précipitant les poussières par des jets d'eau disposés dans les différentes sections du tuyau collecteur de poussières,

on peut faire rentrer dans le travail les boues ainsi obtenues, le tout sans préjudice pour le tirage du séchoir.

La filtration humide est rarement employée seule ; le plus souvent on la combine avec le cyclone, qui élimine dès lors la majeure partie de la poussière, tandis que la poussière la plus fine est précipitée par injection d'eau sous forme de buée.

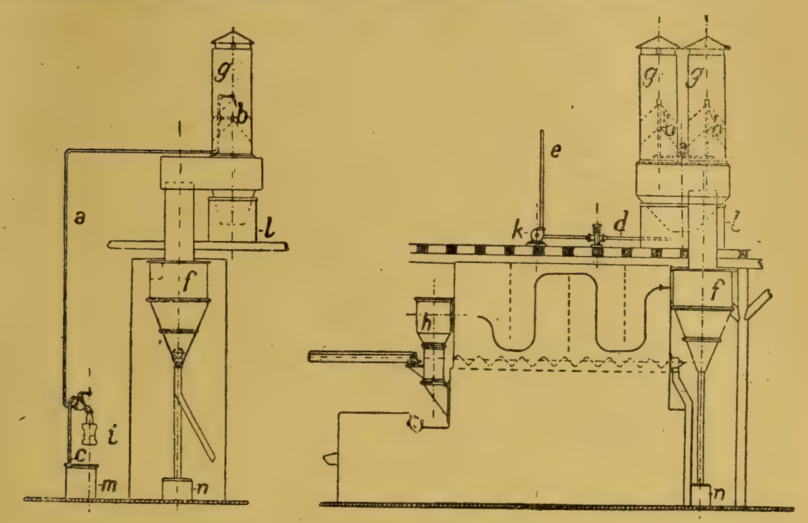


Fig. 155 et 156. — Inst. de dépoussiérage (chambre à poussière, cyclone et laveur à gaz combinés)

Terminons ce chapitre par un exemple d'installation dans laquelle se trouvent réunis la chambre à poussière, le cyclone et le laveur à gaz, et qui dessert un tambour séchoir Cummer. Dans les figures 155 et 156 qui représentent cette combinaison, *a* est la conduite d'eau sous forte pression, *b* sont les pulvérisateurs, *c* un tuyau de surpression muni d'une soupape de sûreté, *d* le tuyau d'aspiration de la boue, *e* la conduite de refoulement de la boue à l'atelier de briquetage, *f* le cyclone, *g*, *g* les cheminées d'évacuation de la buée, *h* le ventilateur, *i* la pompe à eau, *k* la pompe centrifuge à boue, *l* le collecteur de boue, *m* le réservoir d'eau et *n* la *caisse à boue.*

CHAPITRE XII

DESCRIPTION D'USINES A CIMENT

FABRIQUE DE CIMENT PORTLAND COURONNE (PROCÉDÉ HUMIDE) (1)

Le procédé employé dans le Boulonnais est la voie humide, consistant à délayer à grande eau des marnes très argileuses avec d'autres marnes plus calcaires, pour arriver à former un mélange contenant 21 % d'argile.

Le calcaire de Nesles et l'argile de Châtillon employés à la Société des Ciments français qu'on peut citer comme types ont la composition suivante après calcination :

	Calcaire	Argile
Silice	16,92	58,80
Alumine	4,80	17,88
Sesquioxyde de fer	2,14	5,72
Chaux	74,73	13,00
Magnésie	1,00	1,03
Acide sulfurique	0,12	2,19
Eléments non dosés	0,29	0,38

La pâte obtenue est envoyée dans de grandes citernes où elle se décante, l'eau est évacuée par des vannes, et la pâte est transportée dans des séchoirs pour être ensuite cuite dans des fours droits intermittents ou dans des fours rotatifs.

L'introduction des fours continus droits a été déjà un progrès sensible dans la fabrication ; mais ces fours maintenant délaissés pour faire place au four rotatif dont le premier, installé dans la région du Nord, l'a été à Haubourdin. L'usine érigée primitivement pour fabriquer de la chaux-hydraulique artificielle, est devenue une usine à Portland artificiel.

L'installation du four rotatif a permis de diminuer la main-d'œuvre d'une manière considérable, puisque dans des essais on est arrivé à produire jusqu'à 100 tonnes de ciment par 24 heures avec un seul four. Ce rendement sera même dépassé sous peu

(1) Cf. *Rev. des matér. de construction.*

dans la pratique par l'emploi d'un four de grandes dimensions (3 mètres de diamètre et 50 mètres de longueur). Un premier four ayant ces dimensions fonctionnne dans une usine allemande.

Aussi toutes les usines du Boulonnais remplacent-elles leurs anciens fours par des fours rotatifs ou des fours droits à chargement et vidange automatiques.

La dernière usine qui a accompli sa transformation est la Société des Ciments de Dannes, plus connue sous le nom de sa marque « Portland Couronne ».

Adossée à des montagnes calcairo-marneuses renfermant dans leurs flancs des matières premières suffisantes pour fabriquer du ciment pendant des siècles, elle fait face à la mer, dont elle est séparée par quelques monticules formés par les dunes, qui contribuent à donner au paysage un aspect fort agréable.

Le village de Dannes, où se trouve l'usine en question, est situé près de Boulogne-sur-Mer et à proximité de Paris-Plage.

L'usine fut mise en marche au mois de septembre 1883. Moins d'un an après, elle était admise à concourir aux adjudications pour les travaux des ponts et chaussées. L'établissement est desservi par un raccordement qui le relie à la gare de Dannes-Camiers.

Jusqu'au début de l'année 1907, le ciment était cuit dans des fours verticaux et broyé dans un moulin à boulets, combiné avec un tube-finisseur à galets en silex provenant des usines Krupp de Magdebourg. Depuis lors on a mis en service deux fours rotatifs qui ont donné des résultats satisfaisants. Ils ont une longueur de 35 mètres et un diamètre de 2 mètres.

Avant de nous étendre davantage sur leur construction, il est utile de dire quelques mots de la préparation de la pâte.

Le calcaire marneux est envoyé dans des bassins délayeurs munis à leur sortie de grilles à mailles d'environ un centimètre, de sorte que la pâte n'est délayée que très grossièrement.

Elle arrive ainsi par une rigole dans une fosse d'où elle est puisée par une pompe à clapet qui l'envoie dans un grand tube-broyeur de 1 mètre de diamètre et de 8 mètres de longueur qui réduit la pâte à une grande finesse (5 % de refus sur le tamis de 5.000 mailles).

La pâte sortant du tube-broyeur coule dans des bassins dans lesquels on rectifie le dosage, si nécessaire ; elle est refoulée ensuite par des pompes centrifuges dans des bassins homogénéisateurs qui opèrent le mélange parfait de la pâte.

Celle-ci y est aspirée par deux pompes à pistons plongeurs communiquant entre elles à leur partie supérieure, afin qu'une seule d'elles puisse alimenter les deux fours rotatifs en cas de besoin. La pâte sortant des pompes arrive dans deux appareils d'alimentation (un par four) qui sont munis d'une vanne réglant le débit de la pâte à alimenter le four.

Ces appareils distributeurs sont munis de tuyaux de trop-plein par où retourne aux bassins homogénéisateurs la pâte arrivant en excès aux fours. A l'entrée de ces derniers se trouvent, sur une longueur d'environ 8 mètres, des séchoirs de construction spéciale, afin d'accélérer le séchage de la pâte.

L'ouvrier cuiseur peut, de l'endroit qu'il occupe, modérer le chauffage en tirant à la chaîne qui se trouve à la portée de sa main gauche. Cette chaîne actionne l'obturateur du distributeur de charbon en poudre et permet donc de réduire ou d'augmenter la quantité de charbon à chasser dans le cylindre-cuiseur par le ventilateur.

L'insuffleur de charbon fait l'objet d'un brevet. Cet appareil est mobile en tous sens, ce qui permet de déplacer la zone ardente du four. Cela a une grande importance lorsque, la croûte devenant trop épaisse dans la zone de cuisson, il s'agit d'en enlever une partie. Il suffit, en effet, de rapprocher ou d'éloigner cette zone au moyen de l'insuffleur pour faire tomber partiellement cette croûte.

Le ventilateur qui chasse le charbon en poudre dans le four, aspire l'air chaud qui circule autour du séchoir à charbon. Ce dernier est chauffé par l'air chaud aspiré du cylindre refroidisseur pour refroidir les clinkers. Ce cylindre a 1 m. 40 de diamètre et 17 mètres de longueur. A la sortie, les clinkers sont parfaitement refroidis, à tel point qu'on peut les prendre en main. Les clinkers sont enlevés du cylindre refroidisseur pour être conduits au hangar.

Le ciment cuit au four rotatif est de toute première qualité et répond largement à toutes les exigences des cahiers des charges des différentes administrations.

USINE DE LA SOCIÉTÉ DES CIMENTS PORTLAND DE MAXÉVILLE (1)

L'usine de la Société des ciments Portland de Maxéville est située à l'est du village de Maxéville, près Nancy, sur la rive gauche

(1) Cf. *Rev. des matér. de constr.*, avril 1913.

de la Meurthe, le long du canal de la Marne au Rhin (où se font les expéditions par bateau, à l'aide d'un transporteur spécial) ; un raccordement particulier relie l'usine à la gare de Champigneulles par la voie ferrée de Nancy-Saint-Georges. La capacité actuelle de production de l'usine est de 30 à 35.000 tonnes par an.

La composition des matières premières employées est remarquablement constante : on part d'un calcaire très pur, titrant 99 % $CaCO^3$; quant à l'argile, elle est remplacée par un laitier granulé fourni par la Société des Hauts-Fourneaux de Maxéville.

Ce laitier, qui provient exclusivement de fonte de moulage, renferme d'une part 52 % d'argile ($SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3$), d'autre part 42 % de chaux (CaO); la proportion de ($SiO^2 + Fe^2O^3 + Al^2O^3$) ne varie pas de plus de 0,5 à 0,6 %; ce produit peut donc remplacer avantageusement n'importe quelle argile : sa haute teneur en silicate d'alumine en fait une matière première très intéressante pour la fabrication du ciment. L'emploi de laitier pour remplacer l'argile a donné d'excellents résultats en Amérique et en Allemagne; les résultats obtenus jusqu'à présent à l'usine de Maxéville sont également très intéressants.

On mélange le laitier très intimement avec du carbonate de chaux; on en fait des briques qui sont cuites dans les fours à ciment ordinaire; on obtient ainsi un véritable ciment Portland.

Le ciment ainsi fabriqué en partant de calcaire et de laitier granulé ne doit pas être assimilé à du ciment de laitier : il s'agit non pas d'un *mélange* fait à froid comme dans le cas du ciment de laitier, mais bien d'une *combinaison* effectuée dans des fours à ciment produisant un Portland véritable.

Le calcaire arrivant à l'usine est passé dans un concasseur qui le réduit en morceaux de la grosseur d'une noix, puis il est séché dans un séchoir rotatif, ensuite emmagasiné dans un silo en béton. Le laitier granulé suit une marche parallèle; il est également emmagasiné dans un silo en béton voisin du silo à calcaire.

A la partie inférieure de ces silos se trouvent des orifices communiquant avec des bascules automatiques qui pèsent simultanément d'une part la quantité de calcaire, d'autre part la quantité de laitier nécessaires pour faire un mélange cru pour Portland. Ces bascules, qui fonctionnent avec une grande précision, suppriment les erreurs de pesée que peuvent commettre les ouvriers même les plus expérimentés et, par suite, permettent d'obtenir un dosage très régulier.

Les matières brutes ainsi pesées, tombent dans une trémie munie d'un distributeur automatique, qui les envoie dans un broyeur à boulets et de là au tube finisseur, d'où le mélange sort à l'état de poudre impalpable, laissant un résidu de 0,8 à 1 % sur le tamis de 900 mailles et environ 15 % sur le tamis de 5.000 mailles par centimètre carré.

Ce mélange brut est emmagasiné dans des silos, d'où il tombe dans des appareils doseurs qui envoient dans un malaxeur d'une part la farine crue, d'autre part une certaine quantité de combustible. Le mélange (poudre crue et combustible) trituré, convenablement humecté, passe dans un petit bassin alimentant une presse rotative qui débite environ 1.800 briques par heure.

A leur sortie de la presse, les briques sont enlevées par un transporteur à plateaux qui les conduit directement à la plateforme supérieure du bâtiment des fours

L'usine possède une batterie de fours Schneider à tirage forcé, par aspiration ; les gueulards des fours sont reliés par une tuyauterie appropriée à un ventilateur tournant à 5.000 tours et produisant une dépression de 80 à 100 mm. d'eau.

A sa sortie des fours, le clinker est chargé dans des bennes qui se déplacent sur un monorail, puis il est passé au concasseur et emmagasiné dans de grands silos en béton d'une capacité de 3.000 tonnes où il séjourne un certain temps.

Des bennes, également installées sur monorail, emmènent le clinker de ces silos pour le conduire aux appareils broyeurs, d'où il sort à l'état de ciment fin, laissant un résidu de 1 % sur le tamis de 900 mailles et de 12 à 15 % sur le tamis de 4.900 mailles par centimètre carré.

Ce ciment est emmagasiné dans des silos d'une capacité de 3.000 tonnes, d'où il est extrait après un certain temps de repos, pour passer finalement aux bascules ensacheuses.

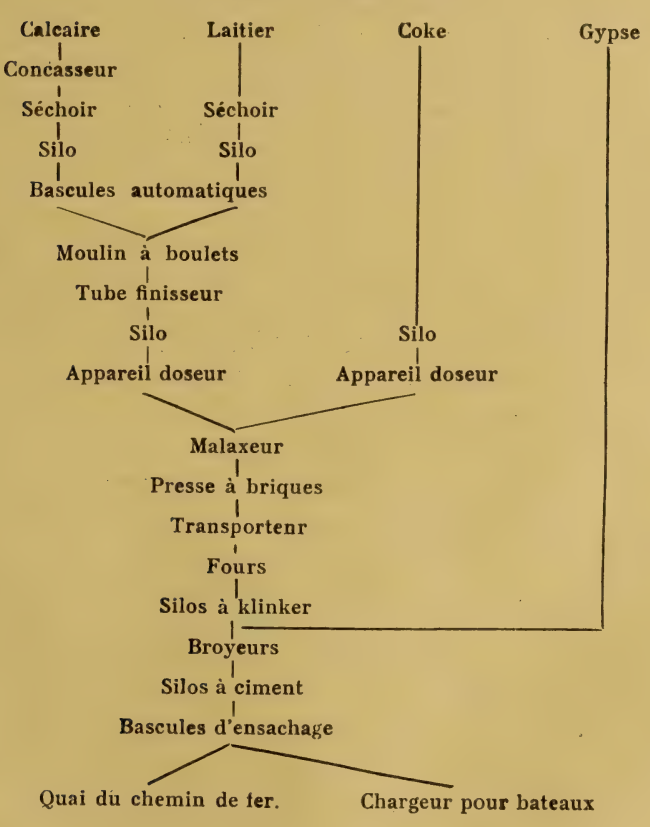
L'usine possède un laboratoire muni de tous les appareils nécessaires au contrôle de fabrication (tant au point de vue chimique qu'au point de vue physique), depuis l'arrivée des matières premières à l'usine jusqu'à la sortie du ciment. Des essais sont faits heure par heure, pour vérifier la constance du mélange à cuire, la finesse et le temps de prise du produit fini, etc. Le laboratoire fait en outre de nombreux essais de résistance à l'arrachement et à la compression.

Quoique de création récente, l'usine de Maxéville fabrique dès maintenant un ciment de qualité irréprochable et qui peut rivaliser avec les autres produits français.

D'après l'analyse, le ciment Portland obtenu se compose comme suit :

Perte au feu	0,37
SiO^2	20,79
Al^2O^3	9,31
Fe^2O^3	2,11
CaO	63,84
MgO	1,99
SO^3	1,31
Perte et non dosé	0,28
	100,00

Schema de fabrication



FABRIQUE DE CIMENT DE VISBY (ILE DE GOTTLAND). (PROCÉDÉ HUMIDE)

Cette usine met en œuvre du calcaire dur en appliquant le procédé humide.

L'île de Gottland occupe une superficie d'environ 3.000 km²; elle est de formation silurienne : grès, pierre, calcaire, schiste argileux. Dans l'intérieur de l'île se trouvent de grandes tourbières qui sont exploitées industriellement et fournissent le combustible nécessaire pour la production de la force motrice de la fabrique de ciment. La température moyenne de l'île est de 6° C; la température la plus basse est de — 12°.

Depuis 1645, l'île de Gottland appartient à la Suède. Elle est en communications journalières avec la terre ferme par un service de vapeurs; la distance qui la sépare de Stockholm est de 186 km.

La fabrique de ciment de Visby a été créée en 1880. On s'est d'abord heurté à de grandes difficultés de fabrication, comme d'ailleurs dans toutes les usines à cette époque. Le calcaire très dur (c'est cette même pierre qui avait servi à la construction du dôme du vieil archevêché d'Ypsala), était broyé à l'aide de moulins à meules, et la matière était soumise à la cuisson dans des fours à coupole, chauffés avec du coke.

Dix ans plus tard, on modifia l'installation en y introduisant le four Schneider; en même temps on y construisit des fours à coke pour obtenir sur place le combustible nécessaire à la cuisson du ciment. Enfin, en 1898, l'usine fut agrandie : on y installa des fours rotatifs en même temps qu'un nouveau procédé de préparation des matières premières. Et comme cette nouvelle installation exigeait une force motrice beaucoup plus considérable, on transforma la station de force motrice existante pour l'approprier à l'utilisation de la tourbe. La nouvelle installation forme un tout absolument indépendant; elle est bâtie sur la roche calcaire, et possède dans son voisinage immédiat une carrière exploitée provisoirement sur une épaisseur de 8 m.

La pierre calcaire est recouverte d'un déblai allant de 0 m. 50 à 1 m. ; elle est d'une grande dureté, de nature cristalline par endroits et d'ailleurs très irrégulière. Sa teneur en carbonate de chaux varie de 80 à 95 %. On l'extrait à l'aide de perforatrices pneumatiques et de dynamite; des wagonnets basculants la déversent directement dans les broyeurs à mâchoires.

L'argile plastique employée à la fabrication est extraite d'une

carrière située à environ 500 m. au nord de l'usine et séparée de la mer par une bande de terre de 20 m. L'argile est mélangée de sable et de fragments de granit dont le poids varie de 100 à 1.000 gr. C'est pourquoi il est indispensable de la traiter par délayage, et la quantité de granit éliminée journellement du délayeur n'est pas moindre de 1 m^3. De la carrière l'argile est convoyée à l'usine par wagonnets roulant sur câble qui la déversent directement dans le délayeur. L'usine possède encore un autre gisement d'argile de réserve, situé à proximité. Les morceaux de granit et le sable extraits du délayeur sont évacués par un tunnel creusé sous la machine à l'aide de wagonnets qui les conduisent à la mer.

L'usine est reliée directement par chemin de fer avec le port de Visby situé à 1 km. 500. Ce port est libre de glace pendant tout l'hiver; il est accessible aux bateaux jaugeant jusqu'à 2.000 tonnes. Du chemin de fer le ciment est chargé directement dans les bateaux. Inversement, le charbon, de provenance anglaise, est déchargé directement dans les wagons qui le transportent à l'usine. L'installation de la production de force motrice de la fabrique est intéressante en ce sens qu'elle est actuellement la plus importante parmi celles qui emploient la tourbe comme combustible. L'usine fait extraire la tourbe de ses propres carrières. La tourbe est d'abord séchée à l'air, puis brûlée dans des générateurs. Les gaz produits, après épuration et filtration, alimentent 3 moteurs à gaz développant ensemble une puissance de 1.000 chevaux. On a prévu l'installation d'un moteur supplémentaire de 500 chevaux. Dans les conditions où se trouve l'usine, le cheval-heure revient à 0 fr. 11 non compris le service, l'intérêt et l'amortissement. Les moteurs à gaz sont accouplés avec des dynamos et l'énergie est transmise aux diverses stations de l'usine par voie électrique.

Comme nous l'avons fait observer plus haut, la préparation des matières premières se fait par le procédé humide. La pâte épaisse ainsi obtenue est soumise à la cuisson dans des fours rotatifs de 43 m. de long, 2 m. 10 de diamètre et à zone de scorification élargie à 2 m. 40. Les fours rotatifs sont chauffés avec du charbon anglais ayant la composition suivante :

Humidité	0,21 %
Matières volatiles	23,1 »
Cendres	8,5 »
Valeur calorifique	7,635 calories

Le ciment produit a une couleur gris-verdâtre; il ne donne que

des traces de refus au tamis à 900 mailles par cm² et 11 % de refus au tamis à 4.900 mailles. Gâché avec du sable allemand normal, il donne un mortier possédant les résistances suivantes :

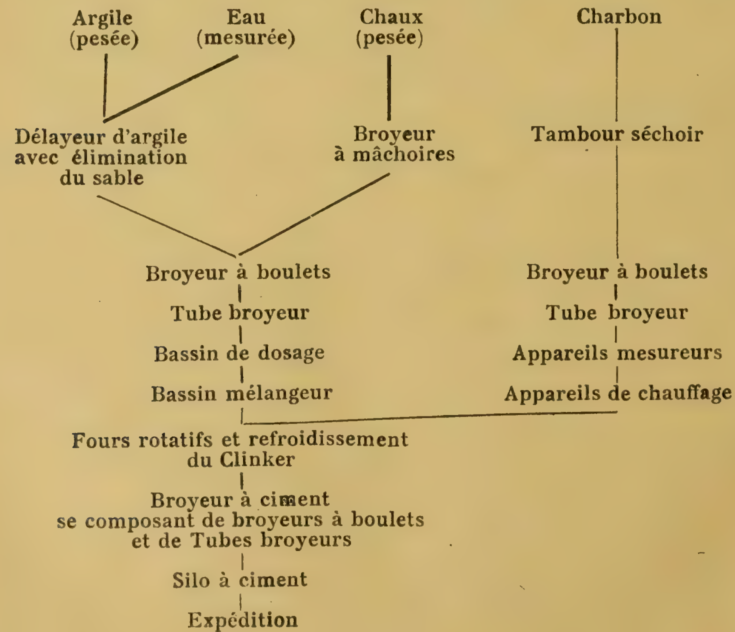
Résistance à la traction par cm² 7 jours	Résistance à la compression par cm² 7 jours	
25 kg,5	305 kilog.	En mortier sec 1 : 3
26 ,5	325 »	
27 ,0	330 »	
27 ,5	325 »	
26 ,5	305 »	
Moyennes : 26 kg,6 par cm²	318 kg. par cm²	

L'analyse du ciment ayant fourni les échantillons a donné les résultats suivants :

SiO^2	21,6 %
Al^2O^3	64,5 »
CaO	64,5 »
MgO	2,8 »
Perte à la calcination	2,1 »
Reste	2,6 »
Module hydraulique	2,27 »

On voit que sa teneur en chaux est très élevée.

La marche des opérations est représentée par le schéma suivant :



Suivons maintenant la marche des opérations.

L'argile amenée à l'usine par des wagonnets roulant sur câble est déversée directement dans le délayeur et additionnée d'une quantité d'eau suffisante, soit environ 50 %. Les pierres et le sable sont éliminés par un dispositif latéral, et la pâte est élevée par une pompe dans un appareil mesureur et de là dans le tube broyeur humide. Le bassin pour l'élimination du sable sert en même temps de réservoir pour la pâte d'argile et peut en contenir la quantité nécessaire pour un travail de 10-12 heures, ce qui permet de supprimer le travail de nuit dans le délayeur.

La pierre à chaux est concassée dans un broyeur à mâchoires, dont le service n'exige qu'un seul ouvrier. Après broyage, elle est amenée dans des réservoirs supérieurs où l'on y ajoute une proportion de boue argileuse préalablement mesurée, puis on soumet le mélange au broyage dans des broyeurs à boulets en acier. Dans ces broyeurs on règle l'addition d'eau de manière à ce que le mélange en contienne 34 %. Dans le système de broyage humide la matière est tamisée à l'état humide de manière que les gros fragments retournent dans le broyeur, tandis que les grains traversant le tamis n° 10 sont amenés dans les tubes broyeurs, tout comme dans le procédé sec. Les tubes broyeurs sont construits pour produire une boue aussi épaisse que possible. Celle-ci est ensuite dirigée dans des bassins doseurs dont chacun a une contenance de 14 m³ et est vidé alternativement dans deux grands bassins mélangeurs et de réserve. Les bassins de réserve ont une capacité de 220 m³, suffisante pour alimenter les fours rotatifs pendant 36 heures. Le tableau suivant permet de se faire une idée de la nature de la matière dans les différentes périodes du broyage :

	Résidu sur tamis n°				
	10	20	900	9.400	Teneur en eau
Matière broyée dans le broyeur à boulets	2,9	8,1	30,9	44,8	32,8
Matière retournant dans le broyeur pour y subir un nouveau broyage	30,9	52,5	70,4	75,3	19,0
Matière tamisée allant du broyeur à boulets dans le tube broyeur	—	0,9	23,5	38,9	34,0
Pâte achevée dans le tube broyeur	—	—	0,8	9,8	34,0

Des bassins de réserve la pâte est amenée à l'aide d'une pompe à deux cylindres dans un petit bassin muni d'un appareil mesureur et alimentant les fours rotatifs. La boue en excès dans ces bassins retourne dans les bassins de réserve.

Le rendement du four, déterminé par des essais d'une durée de 3 semaines, est de 81 tonnes équivalant à 477 barils de ciment par 24 heures; la dépense de combustible séché est de 23 %.

Un autre essai de rendement a donné 96 tonnes = 565 barils de ciment en 24 heures, avec une dépense de 26 % de charbon.

Dans les deux essais, on a mesuré la température des gaz de la combustion, qui se maintenait sensiblement à 400° C. On a mesuré en même temps la température de l'air de la combustion entrant à l'extrémité inférieure du four, et on a trouvé qu'elle était de 65° C., c'est-à-dire très favorable à la cuisson, grâce au mode de chauffage employé.

Avant d'être réduit en poudre, le charbon est préalablement séché dans un tambour séchoir avec une partie de l'air chauffé par son passage dans le cylindre refroidisseur à clinker. Ce mode de séchage permet de régler très exactement la marche de l'opération et d'éviter toute surchauffe qui aurait l'inconvénient de faire perdre au charbon une partie de ses principes volatils. Lorsque le charbon est convenablement séché, il est broyé d'abord à l'aide du broyeur à boulets, ensuite dans un tube finisseur.

Les clinkers, obtenus à l'état de roches plutôt petites, accusent une température de 25° à la sortie du refroidisseur. Ils sont amenés au dépôt qui leur est affecté par un système de transport automatique et, après avoir été conservés pendant un temps suffisant, ils sont élevés aux broyeurs à ciment par un transporteur automatique incliné.

Les clinkers subissent un broyage préparatoire dans des broyeurs à boulets; le broyage fin s'effectue ensuite dans des tubes broyeurs. Les broyeurs à boulets contiennent une charge de 3.200 kg. de boulets en acier, et les tubes broyeurs une charge de silex de 10.000 kg. Le ciment achevé sortant des tubes broyeurs est pesé sur une balance automatique, puis il est déversé sur une courroie de transport qui l'amène aux silos d'ensachage.

Le rendement contrôlé de chaque groupe de broyeurs est de 527 kg. par heure de ciment donnant 0,25 % de refus sur tamis de 900 mailles, et de 11,7 % de refus sur tamis à 4.900 mailles.

Les moulins à ciment sont reliés avec des chambres à poussière et des filtres à air qui assainissent l'air de l'atelier. D'ailleurs, comme l'usine travaille d'après le procédé humide, tout dégagement de poussière est supprimé dans les autres phases du travail.

Pour régler le temps de prise du ciment, on ajoute au clinker un peu de plâtre, suivant un usage généralement suivi. A cet effet, le plâtre est préalablement concassé dans un petit broyeur à mâchoires pour être ajouté ensuite au fur et à mesure au clinker dans le broyeur à l'aide d'un appareil automatique.

La production annuelle pour le système à un seul four rotatif provisoirement en fonctionement, est de 175.000 barils, soit de 350.000 barils pour le système à 2 fours rotatifs.

Chacun des deux systèmes exige :

1 ouvrier desservant le broyeur à mâchoires.

1 » » le délayeur d'argile.

1 » » le broyeur à boulets.

1 cuiseur desservant le four rotatif.

1 ouvrier graisseur qui surveille en même temps l'amenée de la pâte.

1 ouvrier desservant le broyage du charbon.

1 ouvrier pour l'amenée du charbon.

2 ouvriers desservant les broyeurs à ciment.

2 ouvriers pour le convoyage des clinkers et

2 contre-maîtres surveillant l'installation totale.

Cette énumération ne comprend donc pas le personnel employé à l'extraction des matières premières et à leur convoyage, ni le service de production de la force motrice.

A ces points de vue, l'usine de Visby se présente comme un type pour ainsi dire classique et c'est pourquoi nous avons tenu à en donner une description aussi détaillée.

FABRIQUE DE CIMENT D'ORIGNY SAINTE-BENOITE (PROCÉDÉ HUMIDE)

L'usine à ciment Portland d'Origny Sainte-Benoîte a été construite et mise en route dans l'année 1909.

Comme l'usine de Visby qui vient d'être décrite, cette usine travaille par la voie humide; mais tandis que les matières de l'usine de Visby sont très dures, de sorte qu'il faut les broyer dans des broyeurs à boulets, l'usine d'Origny possède une craie qui est susceptible d'être traitée par délayage. C'est donc surtout dans le

mode de préparation des matières que se trouve la différence entre les deux usines.

L'usine de ciment Portland d'Origny Sainte-Benoîte est située près d'un canal et reçoit le charbon et l'argile par bateau, tandis que la carrière à craie est située à une distance d'une centaine de mètres de l'usine ; tous les appareils sont actionnés par l'électricité, à l'aide de courant triphasé produit dans la station de force installée dans un bâtiment spécial.

La transmission de la force par l'électricité a donné une grande facilité pour l'installation des machines et a rendu possible l'aménagement de toute l'usine dans les vieux bâtiments d'une ancienne sucrerie.

Les matières premières sont amenées à l'usine par des wagonnets, la craie arrivant directement de la carrière et l'argile des bateaux ou bien du dépôt situé devant l'atelier à cru; elles sont déversées directement dans les délayeurs.

Les délayeurs consistent en de grands bassins dans lesquels tournent deux herses munies de fortes dents en acier, qui réduisent le calcaire et l'argile, sous l'action d'une certaine quantité d'eau, en une pâte épaisse grossière; une chaîne à godets monte cette pâte dans le tube-broyeur où s'effectue le broyage fin.

Un seul des deux délayeurs suffit pour préparer la quantité de matières premières nécessaires pour la production de 10 à 12 tonnes de ciment par heure; la pâte achevée qui sort du tube-broyeur a une finesse correspondant à un refus d'environ 3 % sur le tamis de 4.900 mailles (refus calculé sur la matière sèche). La teneur en eau de la pâte est un peu plus élevée que dans celle de l'usine de Visby : elle est d'environ 38 %, ce qui relève du fait que les matières d'Origny sont assez grasses et broyées à la grande finesse indiquée.

La pâte finie qui sort du tube est dosée dans les 4 bassins de dosage et ensuite emmagasinée dans les grands bassins collecteurs qui se trouvent au-dessous du four rotatif dans lequel la pâte est refoulée à l'aide d'une pompe à piston.

Le four rotatif a une longueur de 43 m. sur 2 m. 10 de diamètre ; il est muni d'une zone de cuisson élargie de 2 m. 40. En marche ordinaire, on obtient une production moyenne de 90 à 100 tonnes de ciment par jour.

Le chauffage du four se fait avec l'air de combustion sous pres-

sion, c'est-à-dire que l'air froid est refoulé à l'aide d'un ventilateur dans l'enveloppe du refroidiseur à clinkers et passe dans celui-ci en sens inverse des clinkers. Par son contact avec les clinkers incandescents qui tombent du four, l'air se réchauffe à une haute température et sort ensuite pour servir en partie à la combustion dans le four et en partie pour le séchage du charbon.

Le broyage du charbon s'effectue à l'extrémité du four. L'atelier à charbon se compose d'un séchoir et des appareils de broyage du charbon; celui-ci est ensuite emmagasiné dans de grands entonnoirs situés au-dessus des appareils de chauffage du four et refoulé dans celui-ci à l'aide d'un courant d'air.

Les clinkers froids qui sortent du refroisseur sont emmagasinés dans les grand halls à clinkers et conduits jusqu'au moulin à ciment après un emmagasinage de quelques semaines.

Le broyage du ciment s'effectue dans un broyeur à boulets travaillant avec 3.600 kg. de boulets en acier et dans un tube broyeur dont la charge est de 10.000 kg. de galets de silex. La production du moulin à ciment est en moyenne de 3.000 à 7.000 kg. de fin donnant un refus d'environ 15 % sur le tamis de 4.900 mailles.

Les silos pour le ciment achevé se trouvent à une distance de quelques mètres du moulin à ciment; ils sont munis d'un système de vidange automatique et les sacs remplis peuvent être expédiés directement dans les wagons du chemin de fer sur un raccordement spécial qui entre dans l'usine devant les silos, ou bien chargés sur les bateaux en passant par un couloir qui conduit de la salle d'aménagement jusqu'au bord du canal.

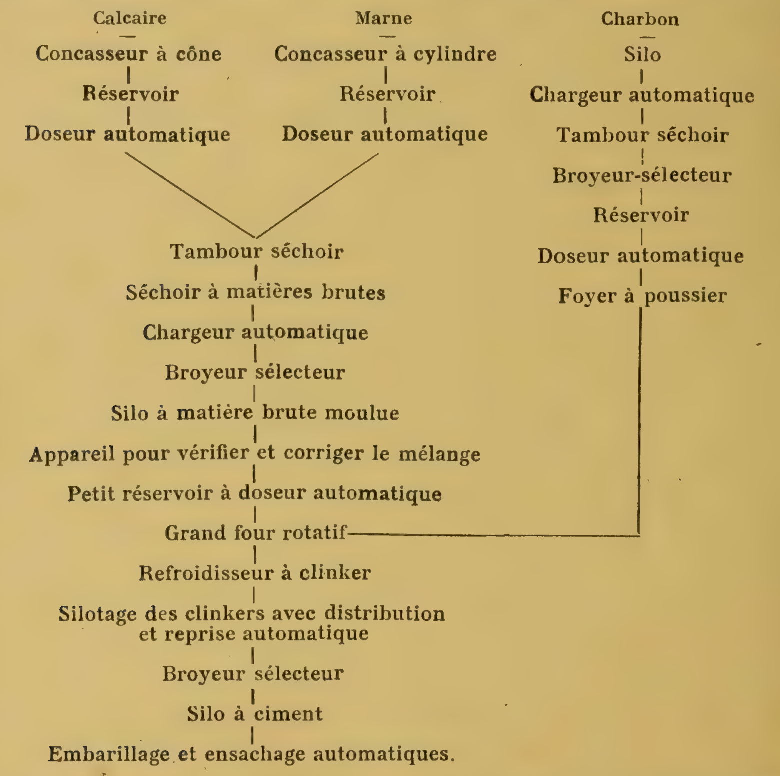
FABRIQUE DE CIMENT TRAVAILLANT PAR LE PROCÉDÉ SEC, INSTALLÉE PAR LA MAISON PFEIFFER FRÈRES

La fabrique que nous allons décrire met en œuvre des matières premières dures et travaille par le procédé sec. La marche des opérations est représentée par le schema de la page suivante.

Comme le montre ce schema, les matières premières (pierre calcaire et argile) sont broyées séparément et dirigées ensuite dans des réservoirs intermédiaires. A partir de là le travail s'effectue d'une manière absolument automatique et indépendamment du bon vouloir des ouvriers. Les matières sont prélevées des réservoirs intermédiaires et mélangées en proportions établies par

l'analyse au moyen de doseurs automatiques; elles sont dès lors travaillées ensemble.

Elles sont tout d'abord séchées dans des tambours-séchoirs, ensuite emmagasinées dans des silos intermédiaires, puis broyées à l'aide d'un broyeur sélecteur qui les réduit en poudre ne donnant que 1-4 % de refus sur le tamis n° 200 (à 5.000 mailles par cm²).



La poudre brute ainsi obtenue se rend dans de grands silos d'attente dont un est constamment en remplissage, un second servant à alimenter les fours rotatifs, tandis que les autres tiennent la matière en réserve pour permettre au chimiste de l'usine de contrôler l'exactitude du mélange et de faire rectifier au besoin le rapport de l'argile à la chaux au moyen d'appareils appropriés.

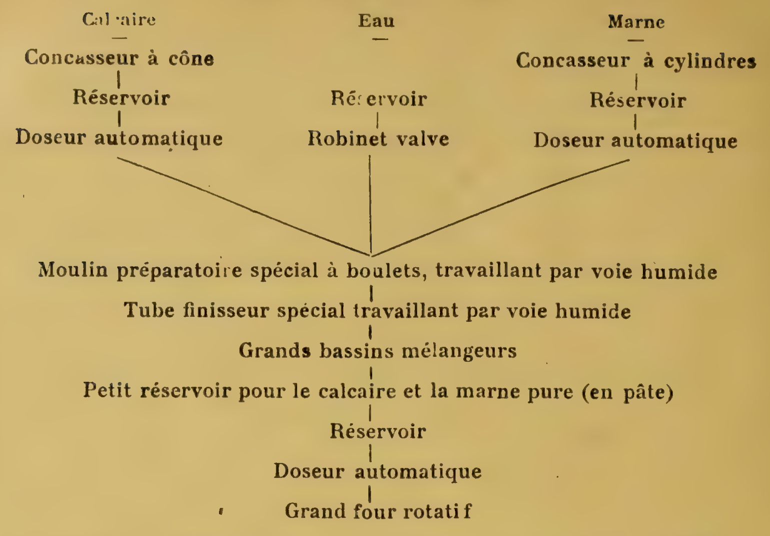
La poudre brute est chargée dans les fours rotatifs à l'aide de doseurs automatiques; elle va à la rencontre des gaz chauds, s'échauffe tout d'abord et subit ensuite la cuisson jusqu'à la scorification dans la zone élargie.

Les clinkers sont refroidis dans des tambours refroidisseurs doubles; ils sont ensuite conduits automatiquement aux silos à clinkers où ils sont conservés pendant un certain temps. Des silos ils sont amenés automatiquement au broyeur-sélecteur qui les réduit en poudre fine ne laissant que 0,5 à 4 % de refus sur le tamis n° 200 (5.000 mailles par cm²). Le ciment achevé est évacué automatiquement soit dans les petits silos des embarilleurs et des ensacheurs automatiques, soit dans les chambres des grands silos d'où il est ensuite prélevé au fur et à mesure des expéditions.

Le charbon, emmagasiné en l'état où il a été amené à l'usine, est conduit dans un petit silo d'où il se rend automatiquement dans un tambour-séchoir, chauffé par les gaz chauds du refroidisseur à clinkers. En sortant du séchoir, il est broyé dans un broyeur-sélecteur et réduit en poudre fine ne laissant que 3 à 5 % de refus sur le tamis n° 200 (5.000 mailles par cm²). La poudre de charbon est amenée dans un petit réservoir et de là elle est chargée dans des fours rotatifs au moyen d'un doseur automatique d'une grande précision. Des dispositifs particuliers employés pour le chauffage au poussier et pour la régularisation de la marche de la cuisson permettent de réduire la dépense de combustible au strict minimum.

L'usine dont nous venons d'esquisser la description produit 400 à 450 tonnes de ciment par jour. Comme on le voit par ce qui précède, cette installation est très simple, facile à surveiller ; tout mouvement inutile des matières est supprimé. L'emploi de balances automatiques permet de contrôler incessamment la marche du travail. Malgré la grande production de l'usine, le nombre d'ouvriers est tellement restreint, grâce au fonctionnement en quelque sorte automatique de l'ensemble, qu'elle est absolument à l'abri des grèves. Dans les conditions actuelles, c'est là un point excessivement important. Enfin, le prix de revient du ciment, qui est de toute première qualité, est excessivement avantageux.

Pour la mise en œuvre des matières dures par la *voie humide* (délayage épais), la maison Pfeiffer frères construit également des broyeurs spéciaux qui sont très appréciés des fabricants de ciment. La marche des opérations est représentée alors par le schema suivant :



Les autres opérations sont les mêmes que dans le procédé par voie sèche.

INSTALLATION DE DÉLAYAGE A L'USINE ALSEN PRÈS DE HAMBOURG

Cette installation présente un intérêt particulier tant au point de vue de sa disposition générale qu'au point de vue de l'exécution des détails.

L'atelier de délayage, les fours rotatifs, le séchage de la houille et le moulin à charbon sont installés dans des bâtiments couverts et fermés de tous côtés.

Les matières premières, argile et craie, sont pesées, amenées séparément par voie ferrée des deux côtés des bassins à délayer et culbutées dans ceux-ci. Les machines à délayer sont installées de façon à permettre un délayage préparatoire, un délayage final et un nettoyage successif des machines sans qu'il soit nécessaire d'interrompre la marche de la fabrication.

La pâte quittant les délayeurs a une teneur normale en eau ; elle s'écoule dans un bassin surmonté de pompes à chaînes qui la chargent dans des tubes finisseurs pour matières humides, par l'intermédiaire d'une vis.

Les conduits de décharge des tubes finisseurs sont installés à une hauteur suffisante pour que la pâte quittant les tubes puisse être répartie dans plusieurs bassins mélangeurs par l'intermédiai-

re d'une vis. Le contenu des bassins mélangeurs est écoulé suivant les besoins de la fabrication. Le nombre de ces bassins est calculé de telle façon qu'on dispose toujours d'une réserve suffisante pour les cas où l'arrivée des matières premières serait interrompue pour une raison quelconque. Une vis reçoit la pâte quittant les bassins mélangeurs et la déverse dans un réservoir surmonté de pompes à chaînes lesquelles distribuent enfin, par l'intermédiaire de vis, la pâte finie dans les réservoirs situés au-dessus des fours rotatifs. Ces derniers réservoirs sont munis d'un système d'agitateurs et d'appareils de décharge assurant l'alimentation régulière des fours.

Les fours rotatifs sont à zone de vitrification élargie, disposition qui, comparativement aux anciens fours, réalise une économie de combustible et une augmentation de production. La pâte qui a pénétré dans le four, obéissant à l'inclinaison et au mouvement de ce dernier, glisse lentement vers la partie inférieure du cylindre à la rencontre de la flamme du poussier de charbon. L'humidité et l'acide carbonique de la pâte sont évaporés et mis en liberté, puis la masse totale est soumise à la vitrification. Les clinkers chauffés à blanc qui quittent le four sont amenées par un plan incliné dans le cylindre refroidisseur par un courant d'air aspiré ; ils se refroidissent rapidement et tombent ensuite du cylindre dans des wagonnets qui les emmènent au moulin à ciment.

Le charbon nécessaire au chauffage des fours est amené par eau ; les chalands sont déchargés à l'aide d'une grue.

La houille est déchargée dans un silo par un élévateur; elle passe ensuite dans un cylindre sécheur traversé par le courant d'air chaud aspiré du cylindre refroidisseur des clinkers.

La houille séchée est broyée dans le moulin à charbon, puis elle est distribuée par un élévateur et une vis dans les petits silos qui surmontent les fours, et enfin elle est envoyée dans ces derniers à l'aide d'appareils automatiques et de ventilateurs à haute pression. Des régulateurs de tours système Polysius permettent de régler à volonté la quantité de poussier à insuffler.

Les silos répartis dans l'usine sont très largement mesurés, de sorte que de légers dérangements de l'une ou de l'autre des machines sont sans influence sur la marche de la fabrication.

L'installation de ces silos simplifie considérablement le service

des machines, parce qu'elle permet aux ouvriers de rester à leur poste et de surveiller plus efficacement le travail des machines. La force motrice pour les fours et les tambours refroidisseurs est fournie par des moteurs électriques ; tous les autres services sont assurés au moyen d'une machine à vapeur et de transmissions.

USINE SILÉSIA A OPPELN (PROCÉDÉ SEC)

Cette fabrique de ciment est une des plus modernes au double point de vue de la disposition et de l'installation ; elle présente de nombreuses particularités qui méritent de fixer l'attention. Tout d'abord ses fondateurs ont fait apport d'un capital suffisant pour la mettre autant que possible en harmonie avec les progrès les plus récents de la technique; ils ont cherché surtout à remplacer le travail manuel par le travail mécanique partout où cela est possible.

L'usine occupe 70 à 80 ouvriers pour l'ensemble des deux équipes de jour et de nuit ; dans ce nombre est compris le personnel affecté au service des machines et des chaudières, à l'empaquetage, aux chargements et au travail de cour. La production annuelle de l'usine est de 400.000 barils de ciments à 170 kg. ; en marche forcée elle pourrait arriver à 450.000 barils.

En prenant le chiffre le plus faible pour la production et le plus grand pour le nombre d'ouvriers, 80 hommes produisent donc 400.000 barils. Un ouvrier correspond donc à 5.000 barils par an ou 16 à 17 barils par jour et la production d'un baril exige 1,2 heure d'ouvrier.

On ne connaît aucune fabrique européenne qui atteigne ou dépasse une proportion aussi avantageuse et il semble même que dans l'Amérique du Nord on n'ait pas encore réalisé une production aussi élevée par an et par ouvrier.

Si, comme tout permet de l'espérer, il sera possible de réduire à l'avenir le personnel de l'usine à 70 hommes et de pousser la production à 450.000 barils, la proportion monterait à 6.400 barils par an ou 21 barils par jour et par ouvrier, et la production d'un baril exigerait 0,94 heure d'ouvrier. Ces derniers chiffres ne sont pas encore atteints, mais peut-être le seront-ils un jour.

La consommation en force mécanique n'est pas aussi importante qu'on pourrait le craindre. Comme force motrice, l'usine dispose d'une machine à vapeur de 1.200 HP. alimentée par 3

chaudières avec de la vapeur à 12 atm. Une machine de 600 HP. et 4 chaudières servent de réserve et fournissent la force et l'éclairage pour le travail dominical des fours et des moulins à charbon. En marche normale, 1 HP. correspond donc à 333 barils par an, ou bien 1 baril exige 18 HP.-heures en comptant 6.000 heures de travail par an.

En tenant compte de la force absorbée par les transmissions, la dépense totale de force se répartit comme suit entre les différents groupes de la fabrication :

	HP.	HP.-heure par baril
Broyage préalable et séchage	87	1,30
Moulin à matières premières	386	5,79
Silo mélangeur de la poudre brute et conduite de celle-ci aux fours	22	0,33
4 fours rotatifs avec ventilateurs	120	1,80
Moulin à ciment et broyage du plâtre	391	5,87
Moulin à charbon	94	1,41
Silo à ciment et empaquetage	20	0,30
Éclairage électrique, transport par câble flottant et différence (pour total)	80	1,20
Total	1.200 HP.	18,0 HP. h. par baril

Ce nombre de 18 HP.-heures-baril comprend la fabrication totale, avec tous accessoires.

Des essais spéciaux faits à l'usine ont démontré que la consommation de charbon sec de bonne qualité est de 23,5 % du poids des clinkers, pour une production moyenne de 468 barils par journée de 24 heures. En marche régulière de longue durée elle fut de 28 à 30 % du poids des clinkers pour un charbon humide ayant un pouvoir calorifique de 6.500 calories, et contenant 12 % de cendres ; pour un charbon sec de 7.000 calories, elle serait d'environ 24 à 26 %.

L'usine Silésia a produit, depuis le jour de sa mise en marche, un ciment de qualité supérieure. Les premiers échantillons de mortier normal essayés ont donné à la traction une résistance de 33 kg. après 28 jours.

Les difficultés à surmonter au début se réduisaient donc à met-

tre le personnel au courant et à le familiariser avec la marche des machines et des fours ; elles furent vaincues sans tâtonnements. La livraison de l'installation aux propriétaires de l'usine et sa mise en marche s'effectuèrent de la façon la plus simple et la plus sûre, à l'instar de ce qui a lieu pour le lancement et les essais d'un navire. La durée de la construction à partir de la commande jusqu'à la mise en marche a été d'un an, quoique les travaux de construction eussent été entravés par une forte gelée qui a duré près de trois mois et arrêtés complètement pendant plusieurs semaines.

Ce résultat remarquable a été atteint grâce à la haute compétence du directeur technique de l'usine, à la grande puissance de travail de la maison qui a construit et installé l'usine dans toutes ses parties, et enfin à la centralisation de l'étude et de l'exécution de l'usine dans une firme unique. Client et fournisseur établirent ensemble la disposition totale de l'installation, puis la fabrique de machines entreprit non seulement la construction dans ses propres ateliers de tous les broyeurs, machines, fours avec tous leurs accessoires, appareils de transport, de lavage, de distribution, de transmission et autres, mais encore l'exécution de toute l'installation, ainsi que l'ajustage et l'adaptation des uns aux autres des nombreux organes jusque dans les moindres détails. Ce travail comprend également la construction des bâtiments, des cheminées, des silos, l'installation des machines à vapeur et des machines électriques ; en un mot toutes les parties de l'installation qui d'ordinaire ne sont pas fournies directement par la fabrique de machines.

Les matières brutes (calcaire, marne, argile) arrivent à l'usine par funiculaire aérien ; elles sont chargées directement dans des laminoirs à deux cylindres.

On met en œuvre simultanément les trois espèces de matières premières qui sont broyées et séchées séparément.

Eu égard à la dureté du calcaire et de la marne, on a adopté le travail par voie sèche comme étant le plus avantageux. Le dosage des trois matières premières broyées et sèches se fait par pesées en proportions déterminées par l'analyse. L'installation comprend trois transporteurs à secousses allant des silos à la bascule. Le mélange est ensuite élevé par des élévateurs à godets jusqu'au réservoir situé au-dessus du broyeur à boulets.

Pour la construction des moulins on est parti de ce principe général qu'une grande machine travaille d'une façon plus rationnelle qu'un grand nombre de petites. On a donc choisi les plus grands moulins à boulets et tubes finisseurs qui aient été construits jusqu'à présent. Pour les matières premières de même que pour le ciment, on a installé chaque fois deux modèles de ces moulins pour le broyage préparatoire, et deux tubes broyeurs pour la mouture fine. Un groupe composé d'un broyeur à boulets et d'un tube finisseur peut fournir de la farine brute pour 200.000 barils, ou peut moudre du ciment pour 200.000 barils ; quatre de ces groupes suffisent donc pour la production annuelle de 400.000 barils de ciment en 300 journées de 20 heures de travail. Cette production correspond à 3,33 barils ou 5.666 kg. de ciment par groupe et par heure. Si l'on tient compte de la dureté bien connue du clinker de four rotatif, on est obligé de convenir que c'est là un rendement excellent.

La Silésia employant des fours rotatifs, trois de ces fours, de 35 mètres de long, à zône de scorification élargie, auraient suffi pour la production de l'usine ; mais, on a préféré installer quatre fours prismatiques de 30 mètres, afin d'en avoir un de réserve et d'assurer ainsi la parfaite régularité de marche.

Le mode de transport du clinker au hall de dépôt constitue une innovation. Ce hall peut se remplir et se vider sans l'intervention de l'ouvrier. Du cylindre refroidisseur le clinker tombe, à travers une grille, sur un transporteur à secousses logé dans un tunnel. L'arrosage des clinkers, au lieu de se faire dans le refroidisseur, ne s'opère plus qu'à partir du moment où les clinkers des quatre fours sont réunis sur le transporteur.

Celui-ci se décharge dans un second transporteur à secousses qui fait suite au premier à angle droit et peut se décharger en trois endroits différents par des orifices munis de clapets. A chacune de trois stations de décharge se trouve un élévateur à godets. Les deux premiers se trouvent dans le hall aux clinkers et sont pourvus de tubes de décharge inclinés, mobiles dans toutes les directions, de façon à pouvoir disperser les clinkers; le troisième se trouve dans le moulin à ciment et charge le clinker dans la trémie d'alimentation située au-dessus du broyeur à boulets. Le sol du hall à clinker est percé d'un certain nombre d'ouvertures fermées par des vannes et servant à écouler les clinkers sur le trans-

porteur à secousses logé dans le tunnel. L'installation fonctionne d'une façon irréprochable et permet de broyer à volonté des clinkers frais ou anciens, ou en mélange des deux sortes.

Dépoussiérage. — Le dépoussiérage des gaz d'échappement se fait dans de grandes chambres à poussières. Des vis situées en dehors des carnaux rassemblent les poussières et les transportent d'une manière continue dans le silo à farine brute.

Réservoirs et silos. — Entre chaque fois deux groupes quelconques d'appareils de l'usine sont installés de grands réservoirs d'attente et des silos, ce qui permet d'éviter les arrêts dans la fabrication; ces silos sont tous à remplissage et à vidange automatique. Pour les silos à matière première et à ciment, les appareils de transport : vis, double vis, appareils à godets, etc., ont une capacité double de celle qui est strictement nécessaire pour le transport des matières à traiter. On utilise cette capacité double pour, à l'aide d'un dispositif ingénieux, ramener chaque fois à son point de départ la moitié de la matière en traitement et obtenir ainsi un mélange parfait. Le silo à matière brute peut contenir de la farine pour 2.600 barils de ciment.

L'entrepôt du ciment est situé de l'autre côté de la voie surélevée, et communique avec l'usine par un tunnel et une vis. Il peut contenir 23.000 barils de ciment. L'emballage se fait à l'aide de deux machines simples d'embarillage et de deux machines doubles à ensacher.

Séchage du charbon. — Le séchage du charbon se fait dans deux cylindres chauffés avec une partie des gaz perdus du cylindre refroidisseur. Le moulin à charbon comprend des broyeurs à boulets et des tubes finisseurs de petit modèle.

Salle des machines. — La salle des machines constitue un local séparé et fermé, à l'abri de la poussière qu'on ne peut complètement éviter. La nature de la force motrice et le mode d'actionnement des machines travaillantes qui fournissent la force motrice obligent de grouper celles-ci autour de la machine motrice. Comme le devis de l'usine prévoyait une machine à vapeur à commande directe, il convenait de placer les deux moulins, principaux consommateurs d'énergie, dans le voisinage de cette machine. L'arbre de couche pénètre directement dans les moulins à ciment et à matière première. Les tubes finisseurs sont commandés par des embrayages à friction. Les broyeurs à boulets sont

munis de poulies fixe et folle. De plus, l'arbre de couche est creux et les accouplements sont disposés de telle façon que l'une et l'autre des deux machines à vapeur puissent actionner à volonté le moulin à ciment ou le moulin à matière brute, ou les deux à la fois. Une seconde file d'arbres commandée par des câbles venant de l'arbre de couche, passe transversalement sous le groupe central des fours. Elle se prolonge d'un côté jusqu'au hall aux clinkers, de l'autre jusqu'à l'installation de séchage et de broyage. Ces deux prolongements sont à embrayage à friction. Chaque four, chaque refroidisseur et chaque tambour sécheur sont munis en outre de poulies fixe et folle.

Enfin une troisième file d'arbres commandée par un câble venant de la précédente, traverse le moulin à charbon et l'installation de séchage adjacente. Les machines de ces deux derniers groupes peuvent être également embrayées ou débrayées à volonté.

La longueur des câbles et des courroies rendait difficile cette disposition; cependant, la solution adoptée est très satisfaisante parce qu'elle ménage complètement l'indépendance des différents groupes et les rend facilement accessibles.

Le problème est plus simple lorsque les appareils éloignés de la machine primaire peuvent être commandés électriquement ou lorsqu'on dispose de chutes d'eau qui permettent d'obtenir la force hydraulique à bon marché. Ce système a été appliqué récemment dans l'usine à fours rotatifs construite à Gmunden pour M. L. Hatschek, l'inventeur du ciment d'asbeste; dans cette usine toutes les machines sont commandées par l'électricité fournie par une chute d'eau.

Pour agrandir l'installation on n'aurait qu'à élever à côté de l'usine existante une seconde usine de toutes pièces semblable à la première et il n'y aurait rien à modifier ni dans la disposition d'ensemble, ni dans le choix des machines, sauf en ce qui concerne la zone de vitrification élargie.

La répartition du travail entre la direction technique d'une usine à ciment d'une part, et le constructeur de machines de l'autre a donné les meilleurs résultats. En Allemagne, on a reconnu depuis longtemps les avantages que présente la répartition du travail entre le conseil ou l'ingénieur-directeur de l'usine et le constructeur de machines. C'est à l'application de ce principe que

l'Allemagne doit le développement de l'industrie spéciale des machines et des fours à ciment, qui est arrivée à un haut degré de perfectionnement.

FABRIQUE DE CIMENT DE LA SOCIÉTÉ ANME A OPPELN (PROCÉDÉ SEC)

Dans la région d'Oppeln, on trouve en abondance la chaux, la marne et l'argile; aussi, plusieurs fabriques de ciment y furent successivement créées, dans lesquelles on s'est efforcé d'appliquer tous les perfectionnements réalisés jusque-là dans l'industrie du ciment. La fabrique que nous allons décrire a été montée pour le compte de la société Anme d'après les plans dressés par les ateliers Fried. Krupp. Elle travaille par le procédé sec et sa production annuelle est de 400.000 barils de ciment à 170 kg. Lors de la création de cette usine on a adopté d'emblée les machines et appareils nécessaires pour effectuer le broyage parfait, le mélange intime et la cuisson des matières premières, et pour réduire le ciment à la finesse requise. Tout en réalisant ainsi les conditions voulues pour la fabrication d'un ciment de première qualité, on s'est efforcé de réduire les frais de fabrication au minimum par l'utilisation judicieuse des gaz chauds des fours, par la réduction de la main-d'œuvre à sa plus simple expression et par l'organisation du transport automatique des matières premières et des produits fabriqués.

Disposition d'ensemble de la fabrique. — L'usine occupe une surface d'environ 10.000 m²; de ses bâtiments émergent deux grandes cheminées et une tour de refroidissement. Le bâtiment principal où s'effectuent les opérations de la fabrication proprement dite, forme un hall de 65 m. × 75 m. exempt de tout mur de refend, ce qui facilite considérablement la surveillance de toute l'installation. Au milieu de ce hall sont installés 4 grands fours rotatifs; on a réservé l'espace nécessaire pour l'installation d'un cinquième four. Sur un côté de cette batterie de fours sont disposées les machines de broyage préparatoire, reliées directement avec les fours destinés au séchage des matières premières.

Devant une des extrémités des fours rotatifs sont installés les silos mélangeurs et alimentateurs de poudre brute; à l'extrémité opposée, où les fours sont raccordés avec les refroidisseurs, se trouvent le séchoir à charbon, le moulin à charbon et l'installation de chauffage du poussier.

De l'autre côté longitudinal des fours s'étend, sur presque toute la largeur du hall, le hangar où sont emmagasinés les clinkers. Attenant à ce hangar se trouve le moulin à ciment monté dans le prolongement du moulin à matières premières, avec lequel il occupe toute la partie latérale du hall qui est à angle droit par rapport à l'axe des fours à ciment.

Toutes les dispositions ont été prises pour l'éclairage et la ventilation : on a ménagé un nombre suffisant de fenêtres dans les murs extérieurs du hall, et on a surmonté le toit qui recouvre la salle des fours d'une lanterne spacieuse, à jalousies réglables.

Les murs extérieurs sont en treillis de fer, et les toitures en tôle ondulée fixée sur fermes en fer. Tous les travaux de l'intérieur sont en fer et en béton.

Les gaz chauds des fours sont évacués par une cheminée haute située en dehors des bâtiments et formant en même temps château d'eau.

Du broyeur à ciment part une courroie transporteuse allant jusqu'aux silos à ciment; ceux-ci sont construits en béton armé et séparés du bâtiment principal par une voie large de 9 mètres. Aux côtés longitudinaux de ces silos sont prévues des rampes de transbordement abritées, avec voies de raccordement.

Dans un autre bâtiment sont installés, avec les salles de réserve, un atelier de réparations, et les laboratoires pour l'analyse des matières premières et des produits fabriqués. Le groupe des bâtiments comprend encore le pavillon de l'administration, l'habitation du directeur, ainsi que des pavillons pour contremaîtres et ouvriers. L'usine est desservie par une station électrique.

Broyage préparatoire et séchage des matières premières. — Les matières premières employées sont la marne et l'argile. La marne, extraite du terrain même de la fabrique, est d'abord réduite en grumeaux de la grosseur d'une noix à l'aide d'un moulin double, composé de deux cylindres supérieurs dentés en acier coulé et de deux cylindres inférieurs de fonte en coquille. La matière broyée est conduite aux deux tambours séchoirs à l'aide d'une chaîne à godets.

L'argile, amenée à l'usine dans des wagonnets, est déversée sur une bande transporteuse inclinée qui la décharge dans un moulin double à cylindres. Celui-ci est à deux paires de cylindres lisses, de fonte en coquille : il réduit l'argile en fragments minces

qui se rendent par un plan incliné dans le tambour séchoir disposé au-dessous du moulin.

Les deux tambours séchoirs à chaux et le tambour séchoir à argile sont généralement chauffés par les gaz perdus des fours rotatifs, mais ils sont également munis de foyers auxiliaires pour le chauffage direct. Pour vaincre la résistance opposée par les tambours au passage des gaz et pour rendre leur fonctionnement indépendant des fluctuations du tirage naturel de la cheminée de l'usine, on a prévu l'installation de puissants ventilateurs aspirants avec conduite correspondante. Grâce à ces appareils, la vitesse des gaz en arrière des fours rotatifs est maintenue dans d'étroites limites, de sorte que ces derniers ne sont nullement influencés par le fonctionnement ou l'arrêt des tambours.

Les gaz perdus des tambours séchoirs sont conduits dans des chambres à poussière où ils se dépouillent des particules de chaux et d'argile entraînées; puis ils se rendent dans la cheminée. La poussière de chaux et d'argile qui s'accumule dans les chambres est réunie par des vis transporteuses à la masse principale des matières premières.

Mouture des matières premières. — Les matières premières séchées sont conduites dans des réservoirs de refroidissement, puis elles sont pesées et mélangées en proportion déterminée par l'analyse, et réduites en farine fine à l'aide de deux moulins à boulets et de deux tubes broyeurs; entre ces deux paires d'appareils est intercalé un réservoir collecteur.

Les broyeurs à boulets sont construits pour un travail continu. Le corps des tubes broyeurs est constitué par un cylindre en tôle d'une seule pièce, soudée à la forge; il est revêtu intérieurement de plaques de fonte durcie; ses parois sont en acier coulé. Les corps broyeurs sont des galets de silex.

Les poussières dégagées par les moulins sont évacuées à l'aide d'un dispositif de dépoussiérage avec ventilateur aspirant, raccordé avec les machines à l'aide de gros tuyaux.

Confection du mélange et chargement de la poudre brute dans les fours. — Les matières, déjà bien mélangées dans les moulins à boulets, sont ensuite conduites au moyen de vis transporteuses et de norias en circuit dans 4 grands silos mélangeurs qui peuvent contenir une quantité de farine brute suffisante pour un travail de 36 heures. Elles y sont mélangées à fond et réparties ensuite

dans des silos d'alimentation installés au-dessus de l'orifice de chargement des fours rotatifs. De ces silos, d'une capacité suffisante pour permettre les arrêts momentanés que peut exiger l'inspection des transporteurs et des élévateurs, la farine est reprise par des agitateurs de vidange, humectée dans des vis d'hydratation, et chargée dans les fours rotatifs. Pour assurer l'alimentation uniforme de ces derniers, on a rattaché le mouvement des agitateurs de vidange et des vis d'hydratation directement à la commande des fours.

Mouture et séchage du charbon. — Le charbon destiné à chauffer les fours à ciment est d'abord concassé dans un broyeur à cylindres dentés et élevé par une noria dans un réservoir collecteur en tôle. De celui-ci il est déversé par un alimentateur automatique dans le tambour séchoir à charbon, chauffé par l'air chaud des refroidisseurs à clinker, aspiré à la tête de ces refroidisseurs par un ventilateur et dépouillé de la poussière dans une chambre de dépoussiérage. L'air ainsi épuré vient chauffer extérieurement les tambours séchoirs; il se dégage ensuite en partie au dehors par une cheminée qui traverse le toit de l'usine, tandis que la partie restante est aspirée par la soufflerie à poussier à travers les tambours et refoulé dans les fours. On obvie ainsi à tout dégagement de poussière dans la sécherie; en outre, on utilise pour le chauffage les principes volatilisés du charbon.

Le charbon séché est évacué des tambours et élevé à l'aide d'une noria dans deux réservoirs collecteurs en fer, d'où il est amené, à l'aide d'alimentateurs à chocs, dans deux tubes broyeurs doubles qui le réduisent en poussier. Ces tubes broyeurs sont constitués par deux cylindres superposés, en tôle soudée au feu, munis de parois frontales en fer et contenant des corps broyeurs en fer. Le poussier est réparti à l'aide d'une vis transporteuse dans des silos d'où il est soutiré par des agitateurs de vidange et envoyé dans des distributeurs spéciaux brevetés. Ces distributeurs peuvent être réglés de manière à recevoir la quantité de charbon nécessaire à la marche des fours; ils amènent le poussier à la conduite de refoulement des souffleries qui le mélangent avec l'air chaud qu'elles aspirent à travers les tambours sécheurs de charbon et lancent ce mélange dans les fours rotatifs. Le poussier en excès, laissé par les distributeurs, est réuni dans une vis transporteuse et ramené dans les silos à poussier par une noria.

Les conduites de refoulement des souffleries à poussier se terminent par des tuyères brevetées qui permettent de régler à volonté la direction des flammes dans le four.

Ces dispositifs permettent, en outre, d'empêcher la formation des dépôts incrustants dans le four, de ménager le revêtement intérieur de ce dernier, d'augmenter son rendement continu et de réduire au minimum la consommation de charbon.

Fours rotatifs pour la cuisson du ciment. — Les fours rotatifs ont un diamètre de 2 m. et une longueur de 30 m. Ils tournent sur des galets au moyen de trois couronnes de roulement. La commande se fait par engrenages avec poulies fixe et folle, attaquant la couronne dentée. Les refroidisseurs à clinker, raccordés aux fours, ont un diamètre de 1 m. 40, une longueur de 17 m. et portent à l'intérieur, sur une longueur d'environ 7 m., un revêtement de maçonnerie destiné à empêcher l'échauffement de la tôle.

Chaque four produit 400 barils de ciment de 170 kg. par 24 heures. Le fonctionnement des fours et des refroidisseurs à clinker donne entière satisfaction à tous les points de vue.

Hangar à clinker. — Les clinkers cuits et refroidis glissent le long d'un plan incliné sur une grille qui, en cas de dégradation des revêtements intérieurs des fours, retient les gros débris de briques réfractaires. De cette grille les clinkers tombent dans une rigole transporteuse qui les conduit à un élévateur à godets; celui-ci les monte dans un réservoir collecteur d'où cinq rigoles transporteuses les prennent pour les déverser sous le hangar à clinker.

Moulin à ciment. — Lorsque les clinkers ont été emmagasinés pendant un temps suffisant, ils sont charriés à la station de broyage du ciment et déversés dans une trémie d'alimentation, repris par un alimentateur à chocs et élevés par une noria dans un réservoir : ils sortent de ce réservoir par deux goulottes et sont chargés par des alimentateurs dans deux tubes broyeurs préparatoires; la matière broyée tombe ensuite par deux goulottes dans les deux tubes broyeurs finisseurs installés au-dessous.

Les tubes broyeurs préparatoires et finisseurs sont de même construction que ceux qui servent à la mouture des matières premières; ils ne s'en distinguent que par la nature des corps broyeurs qui, pour le ciment, sont des boulets d'acier.

Le ciment moulu est pesé sur une bascule automatique et transporté par des courroies sans fin dans les silos à ciment, dans les chambres desquels il est réparti par des vis distributrices à goulottes réglables.

Silos à ciment. — Les silos sont construits en béton armé, ils ont une capacité de 45.000 barils de ciment. Ils comprennent 24 compartiments mesurant chacun 4 m. 50 × 4 m. 50 et environ 13 m. de haut. Ces compartiments se terminent en entonnoir vers le bas, et sont munis de dispositifs de vidange automatique qui conduisent le ciment dans des vis collectrices à l'aide desquelles plusieurs compartiments peuvent être vidés simultanément, ce qui assure l'uniformité du ciment expédié. Les vis collectrices transportent le ciment dans les groupes de 3 silos d'embarillage, un de ces groupes étant disposé sur chacune des deux rampes d'embarillage et de transbordement. Le ciment prélevé des dits silos est embarillé à l'aide de machines spéciales. Une installation de dépoussiérage épure l'air des salles d'embarillage et de transbordement. Les barils (ou les sacs) remplis sont chargés dans des wagons sur les voies de raccordement des rampes de chargement.

Commande. — Pour des raisons de sûreté de fonctionnement, on a prévu deux sources de force motrice indépendantes l'une de l'autre. Les machines et appareils de broyage préparatoire, de séchage et de mouture des matières premières et du ciment sont actionnés au moyen de câbles par un arbre principal disposé sur toute la longueur du hall. Les autres groupes de machines sont à commande électrique. Mais, pour assurer le fonctionnement des fours rotatifs même en cas de dérangements à l'installation électrique, on a prévu des dispositifs qui permettent d'emprunter alors à l'arbre principal la force nécessaire à leur actionnement.

La machine à vapeur qui actionne l'arbre principal par l'intermédiaire de 18 câbles, est une machine compound à double manivelle, munie d'une distribution Collmann et d'un condenseur à injection. Le diamètre du cylindre à haute pression est de 600 mm., celui du cylindre à basse pression est de 1.000 mm. Ces deux cylindres ont une course de 1.200 mm. La puissance de la machine est de 950 à 1.000 chevaux à 95 tours par minute. Le volant, façonné comme poulie à câbles, a un diamètre de 6 m.

Le courant pour la force motrice aussi bien que pour l'éclaira-

ge électrique de l'usine est fourni par une génératrice à courant triphasé de 510 KW, montée à côté de la machine à vapeur et directement accouplée avec une turbine à vapeur Zôlly. La turbine a une puissance de 600 chevaux au minimum et de 700 chevaux au maximum à 3.000 tours par minute. Elle est munie d'un condenseur à surface. Une génératrice triphasée auxiliaire de 85 KW à 750 tours par minute, est actionnée au moyen d'une courroie par l'arbre principal.

La tension dans la canalisation de force motrice est de 500 volts ; pour la canalisation d'éclairage elle est réduite à 120 volts. L'installation d'éclairage comprend environ 20 lampes à arc et 300 lampes à incandescence.

La vapeur est produite dans 5 chaudières à deux tubes foyers et à grille horizontale de 100 m² de surface de chauffe chacune. En arrière des tubes-foyers, il y a 5 surchauffeurs ayant chacun 59 m² de surface de chauffe.

Remarques finales. — Comme le montre la description qui précède, la fabrique de ciment d'Oppeln est munie de toutes les machines et installations qui peuvent contribuer à la fabrication d'un ciment Portland de première qualité au prix le moins élevé. En outre, la disposition judicieuse de réservoirs doseurs ou d'attente ainsi que des machines, réalise la plus grande sécurité de fonctionnement qu'il soit possible d'obtenir. Enfin, aucune des mesures qui assurent le bien-être des ouvriers n'a été omise : l'emploi de protecteurs aux différentes machines et les installations de ventilation et de dépoussiérage assurent la parfaite salubrité des ateliers et préviennent les accidents. Aussi la fabrique de ciment « Stadt Oppeln » peut-elle être citée comme une usine modèle, réalisant tous les perfectionnements de la technique moderne.

FABRIQUE DE CIMENT DE LA « SEABORD PORTLAND CEMENT CO » A ALSEN (NEW-YORK)

Nous avons déjà dit un mot, dans la première partie de cet ouvrage, de l'énorme développement pris par l'industrie du ciment aux Etats-Unis d'Amérique. Les ingénieurs Américains s'étaient tout d'abord inspirés de ce qui se faisait en Angleterre et en Allemagne ; mais ils n'ont pas tardé à suivre une voie nouvelle, adaptée aux conditions spéciales de ce pays ; ils ont ainsi créé un grand

nombre d'installations qui, à leur tour, ont servi de modèles, sous bien des rapports, aux industriels de la vieille Europe. La plupart des usines américaines constituent non seulement des œuvres grandioses, mais présentent encore de nombreuses particularités qui sont le fruit d'études approfondies. Il ne nous paraît donc pas inutile de les étudier de plus près.

L'installation représentée par les figures 157 à 159 appartient à la Seabord Portland Cement Co à Alsen (New-York) ; le broyage de la pierre calcaire, de l'argile, du charbon et des clinkers s'effectue exclusivement à l'aide de moulins du système Füller-Lehigh, dont le nombre sera de 41 lorsque l'usine sera achevée pour atteindre sa production maxima.

La construction de cette usine comprend trois sections. Les matières mises en œuvre sont de la pierre calcaire dure et de l'argile. La première est concassée sur le chantier d'extraction et amenée à l'usine à l'aide de wagonnets roulant sur câble qui sont culbutés sous un hangar. Au-dessous de ce dernier est installée une courroie qui transporte le calcaire concassé dans les tambours-séchoirs installés à côté des fours rotatifs et chauffés par les gaz d'échappement de ces derniers. La pierre calcaire ainsi séchée se rend ensuite dans un magasin qui peut en contenir 4.000 tonnes.

L'argile est extraite immédiatement à côté de la fabrique ; elle contient de 25 à 30 % d'humidité naturelle ; elle est de consistance plastique et difficile à sécher. On l'accumule sous un hangar d'où une courroie l'amène à un moulin désintégrateur ; de celui-ci elle tombe dans deux tambours séchoirs chauffés par un foyer spécial. L'argile partiellement déshydratée est passée ensuite dans un broyeur à cylindres cannelés, de là dans deux tambours séchoirs annexés aux fours rotatifs de même que les tambours de séchage du calcaire, et après achèvement du séchage elle est emmagasinée dans un réservoir d'une capacité de 2.000 tonnes.

Pour le broyage intermédiaire du calcaire on se sert de moulins à boulets de Krupp (sans tamis) ; la matière broyée est envoyée dans un réservoir tandis que l'argile entre dans le mélange sans autre broyage. Le dosage des matières s'effectue par pesées à l'aide de balances automatiques; vient ensuite le broyage finissage dans des moulins Fuller-Lehigh, le transport de la farine brute dans des silos et sa cuisson dans des fours rotatifs de 36 m. de

long × 2 m. 40 de diamètre dont chacun produit journellement 500 à 600 barils de ciment. Les fours rotatifs se vident dans les tambours refroidisseurs dont deux chaque fois communiquent avec une cheminée commune pour le dégagement de la buée résultant de l'arrosage des clinkers avec de l'eau froide. Les fours rotatifs fonctionnent sans ventilateurs et uniquement avec le tirage naturel de la cheminée ; ils sont munis de foyers Matcham que nous avons décrits plus haut.

Le dépôt des clinkers, installé à l'air libre, est desservi par un système de courroies et d'élévateurs. Le clinker qui a reposé est additionné d'une petite quantité de plâtre destiné à régler son temps de prise, puis il passe par un tamis cylindrique à mailles de 13 mm. de section. La matière qui traverse le tamis est amenée directement aux moulins, tandis que le refus est broyé dans un broyeur à boulets de Krupp (sans tamis), puis moulu finement avec la première. Le ciment en poudre est transporté à l'aide de courroies et d'élévateurs au magasin de dépôt où il est ensaché.

Le charbon est séché dans des séchoirs de Matcham et réduit en poudre à l'aide de broyeurs Fuller-Lehigh. Ces opérations s'exécutent dans un bâtiment spécial.

La station de force motrice se compose de machines compound de 1.500 chevaux chacune. Sur deux de ces machines installées tout d'abord, l'une sert à actionner les broyeurs dégrossisseurs et l'autre le broyeur à clinker, le surplus d'énergie disponible est transformé en électricité dans 2 génératrices à courant alternatif chacune de 500 kw. Dans l'agrandissement prévu de l'usine, ces génératrices seront actionnées par une troisième machine à vapeur, de manière à réserver les deux premières uniquement pour actionner les moulins et les broyeurs. Les générateurs et l'installation électrique sont fournis par la Westinghouse Electric and Manufg Co.

L'installation d'extraction des matières premières, située à une certaine distance de l'usine comme nous l'avons dit plus haut, est desservie par un grand moteur pour lequel on dispose d'une tension de 2.200 volts, qui est ramenée à la tension ordinaire au moyen de transformateurs. Les autres moteurs fonctionnant dans les autres stations de l'usine, tels que l'atelier de charbon, celui des fours, l'emballage, l'atelier de réparations, la station des

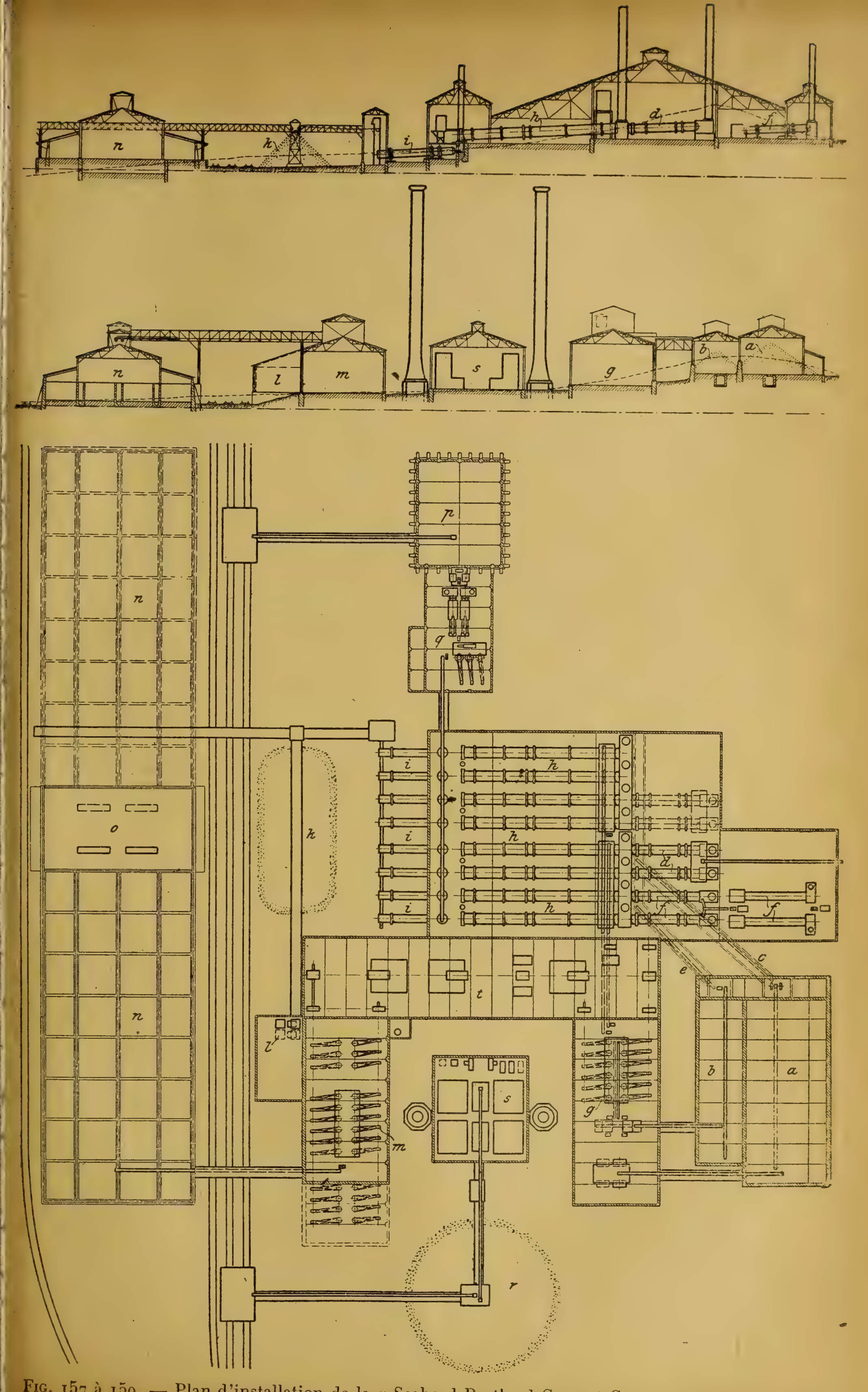


Fig. 157 à 159. — Plan d'installation de la « Seabord Portland Cement Co » à Alsen (New-York)

pompes; ceux qui actionnent les élévateurs et les vis transporteuses travaillent tous à une tension de 400 volts, tandis que les fours sont desservis par des moteurs de 30 chevaux à vitesse variable.

La salle des chaudières comprend 5 chaudières tubulaires de 400 chevaux; cependant le bâtiment est assez vaste pour abriter 4 batteries de deux chaudières. Dans ce même bâtiment sont installées les pompes d'alimentation, les épurations d'eau et les installations de condensation. L'eau froide nécessaire à ce dernier usage est pompée dans l'Hudson River distante d'environ 200 m.

Sous le pont à charbon est installé un vaste entonnoir dans lequel on vide les wagons à charbon. De cet entonnoir, le combustible tombe sur des courroies de transport qui le déversent dans des réservoirs installés entre les chaudières; des réservoirs, le charbon est amené aux foyers des chaudières par chargeurs automatiques. Un autre système de transport installé sous les chaudières évacue les cendres et les scories.

FABRIQUE DE CIMENT DE NEWVILLAGE

Une des plus intéressantes fabriques de ciment Portland des Etats-Unis est celle construite par Edison à Newvillage, New-Jersey (1). L'usine est construite pour une production journalière de 40.000 barils de Portland. Comme matières premières on emploie de la pierre à chaux argileuse appelée *cement stone*, à laquelle on ajoute au broyage de la pierre à chaux pure afin d'obtenir les proportions nécessaires de silice, d'alumine et de chaux. Ces matières sont extraites d'une seule et même carrière, distante de l'usine de 1 km. 600. Les différents bâtiments de l'usine sont assez espacés pour se prêter dans la suite aux agrandissements prévus; la figure 160 en donne le plan.

Les matières premières sont amenées de la carrière au moyen de la voie *z* dans des caisses en tôle en forme de pelle placées sur des wagons; au moyen d'un treuil électrique, ceux-ci sont élevés jusqu'à l'étage supérieur du bâtiment *a* où s'effectue le concassage. La figure 161 indique le mode de déchargement automati-

(1) *Engineering News*, 24 déc. 1903. — *Zeitschr. d. Ver. deutscher Ingenieure*, t. XLIX, p. 381.

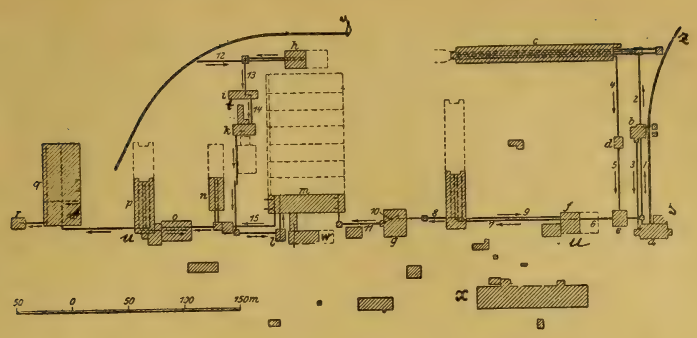


FIG. 160. — Plan de la fabrique de ciment de Newvillage

a Installation de concassage,
b Séchoirs,
c Entrepôt des matières premières,
d Balances,
e Réservoirs collecteurs,
f Moulin pour matières premières,
g Magasins pour matières pre-res pulvérisées,
h Magasin à charbon,
i Séchoir à charbon,
k Moulin à tube,
l Magasin à charbon pulvérisé,
m Bâtiments des fours,
n Silos,
o Moulin à clinker,
p Tamiseur à air,
q Magasin à ciment,
r Emballage.
s Machine compound de 700 HP.
t Machines tandem compound de 250 HP.,
u Machine compound de 700 HP.,
v Machine compound de 500 HP.,
w Ventilateur donnant 45^{m3} d'air à la minute,
x Laboratoires,
y Voie de transport du charbon,
z Voie de transport des calcaires.

que des caisses; elles sont saisies par le crochet d'un câble mû par un deuxième treuil, qui les vide sur les cylindres broyeurs.

Dans le bâtiment *a* une machine compound *v* de 500 HP. actionne 4 broyeurs cylindriques placés les uns au-dessus des autres (*fig.* 168 et 169) et actionnés par 36 câbles. Le broyeur supérieur comporte 2 cylindres de 1 m. 50 de long et 1 m. 50 de diamètre, pesant chacun 25 tonnes; ces cylindres sont espacés de 20 cm. et peuvent recevoir des blocs de 5 tonnes. Ils ne sont pas unis, mais armés de dents. et conduisent les matières premières concassées (pierre calcaire pure ou argileuse) dans le deuxième broyeur à cylindres de 914 mm. de diamètre, qui est muni d'un volant pour pouvoir mettre en œuvre des blocs de grosseur inaccoutumée. Dans ce dernier broyeur, les cylindres sont pressés l'un contre l'autre au moyen de ressorts. Dans ces broyeurs les matières sont réduites en fragments de 13 mm. de diamètre; elles

sont amenées ensuite dans le séchoir *b* (*fig.* 166) au moyen d'une courroie. Là elles tombent sur des cribles constitués par des tôles contrariées laissant entre elles d'étroits passages, et viennent en contact avec les gaz chauds produits par un foyer; leur teneur en eau est ainsi ramenée à 1 % dans l'espace de 26 secondes. Les tôles supérieures du crible sont mobiles; on les secoue de temps en temps afin d'éviter les obstructions.

Les parties qui traversent le crible tombent sur une courroie transporteuse qui les amène au magasin des matières premières

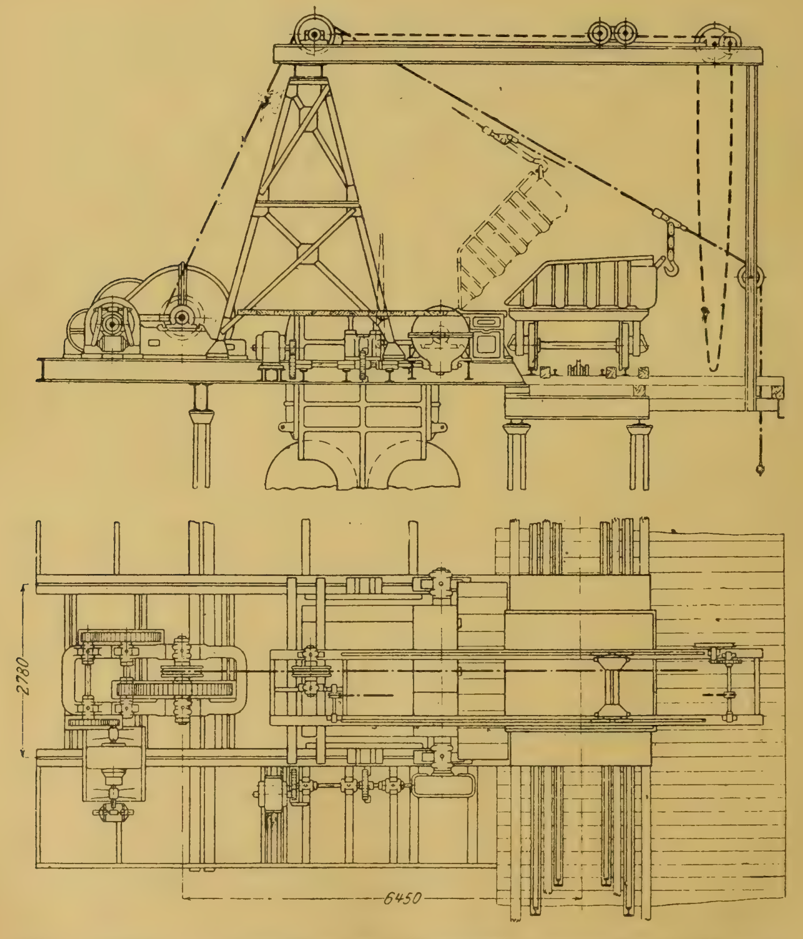


Fig. 161 et 162. — Installation du déchargement automatique des caisses amenant les matières premières

c, tandis que les gros morceaux restés sur le crible retournent aux cylindres broyeurs inférieurs par la courroie transporteuse 3. Avant le déchargement de la matière sèche dans le magasin *c*, on prélève toutes les 2 à 5 minutes des échantillons pour l'analyse chimique.

Dans le magasin *c* se trouvent 7 réservoirs d'une contenance de 1.500 tonnes chacun, dont 4 pour le calcaire argileux, 2 pour le calcaire pur et 1 pour la confection du mélange. Pour remplir et vider chaque réservoir et pour mélanger son contenu avec celui d'un autre réservoir quelconque, on a installé au-dessus et au-dessous des réservoirs 2 transporteurs, dont l'un sert à amener les matières premières et l'autre à les emporter. Les 2 autres transporteurs qui cheminent ensemble hors du magasin font parcourir aux matières premières une espèce de cercle. L'un reçoit la matière première d'un réservoir quelconque et la donne au deuxième transporteur, qui la conduit à un autre récipient. En même temps, un ventilateur envoie, selon les besoins, un courant d'air chaud par dessus les réservoirs, afin d'achever la dessication. Les réservoirs sont constitués par 2 plans inclinés et laissent tomber leur contenu par 6 entonnoirs en tôle sur autant de paires de cylindres mûs par un arbre traversant toute la longueur du magasin et actionné par un moteur électrique de 5 chevaux.

Au moyen du transporteur 4, on conduit aux bascules les quantités nécessaires de marne et de calcaire pur. Là, les deux produits sont mélangés en proportions convenables fixées d'après les analyses. Ce mélange est envoyé au moyen du transporteur 5, dans le réservoir à mélange *e* dont la capacité est de 1.000 tonnes. Enfin, il est réduit presque immédiatement en farine au moyen du moulin *f*, qui le reçoit du transporteur 6. Le moulin *f* est constitué par un broyeur à 3 cylindres de 710 mm. de diamètre, n'ayant qu'une largeur utile de 200 mm. Un des cylindres est actionné au moyen d'une courroie par l'arbre principal de transmission, tandis que les 2 autres sont entraînés par friction.

Contrairement à ce qui se fait dans la plupart des fabriques allemandes de ciment (où la matière est d'abord réduite en sablettes, et ensuite en poudre dans des meules distinctes), la matière est soumise immédiatement au broyage fin, la farine étant séparée incessamment des menus produits à l'aide d'un séparateur à air. A cet effet, les matières premières moulues sont transportées

par une courroie et déversées par le haut dans une caisse, dans laquelle un grand nombre de tôles ralentissent la chute. Un courant d'air venant d'en bas emporte la matière réduite à une finesse suffisante et la dépose dans une chambre voisine, d'où elle est transportée par la courroie 8 dans le magasin à farine *g*. Les parties qui n'ont pas été entraînées et qui arrivent jusqu'au fond de la caisse sont ramenées par la courroie 9 au moulin. Le transporteur les amène au milieu du magasin; là, une vis sans fin les prend et les déverse sur la courroie transporteuse 11.

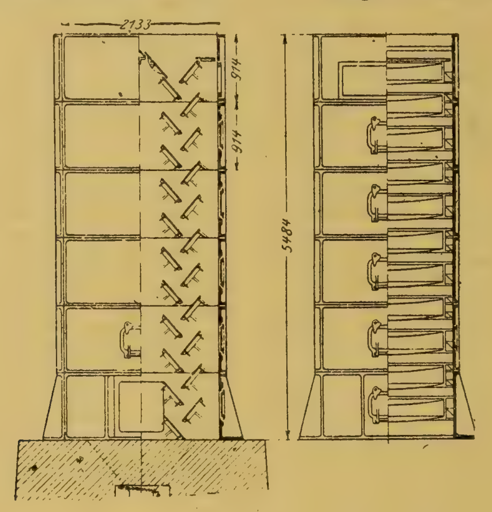


Fig. 163 et 164. — Séchage du charbon

Parallèlement au broyeur pour les matières premières, se trouve le broyeur à charbon, qui produit la farine de charbon nécessaire pour la cuisson du ciment dans les fours rotatifs. Le charbon arrivant par la voie ferrée est transporté par la courroie 12 dans un magasin *h* d'une capacité de 800 tonnes et de là il est emmené par la courroie 13 au séchoir *i* constitué par des réservoirs rectangulaires en fonte de $1,8 \times 2,1$ m² de surface et de 5 m. 4 de hauteur dans lesquels il tombe sur une série de plaques placées obliquement et transversalement. Un courant d'air chauffé par la vapeur d'échappement produit la dessiccation. Le charbon sec est conduit par la courroie 14 dans un moulin à boulets, puis dans un tube-broyeur *k*, qui alimente un magasin à charbon *l*, de 100 tonnes de capacité. On avait tout d'abord voulu broyer le char-

bon comme les matières premières du ciment, mais la séparation de la poudre fine du gruau a donné lieu à une explosion qui détruisit le moulin à charbon.

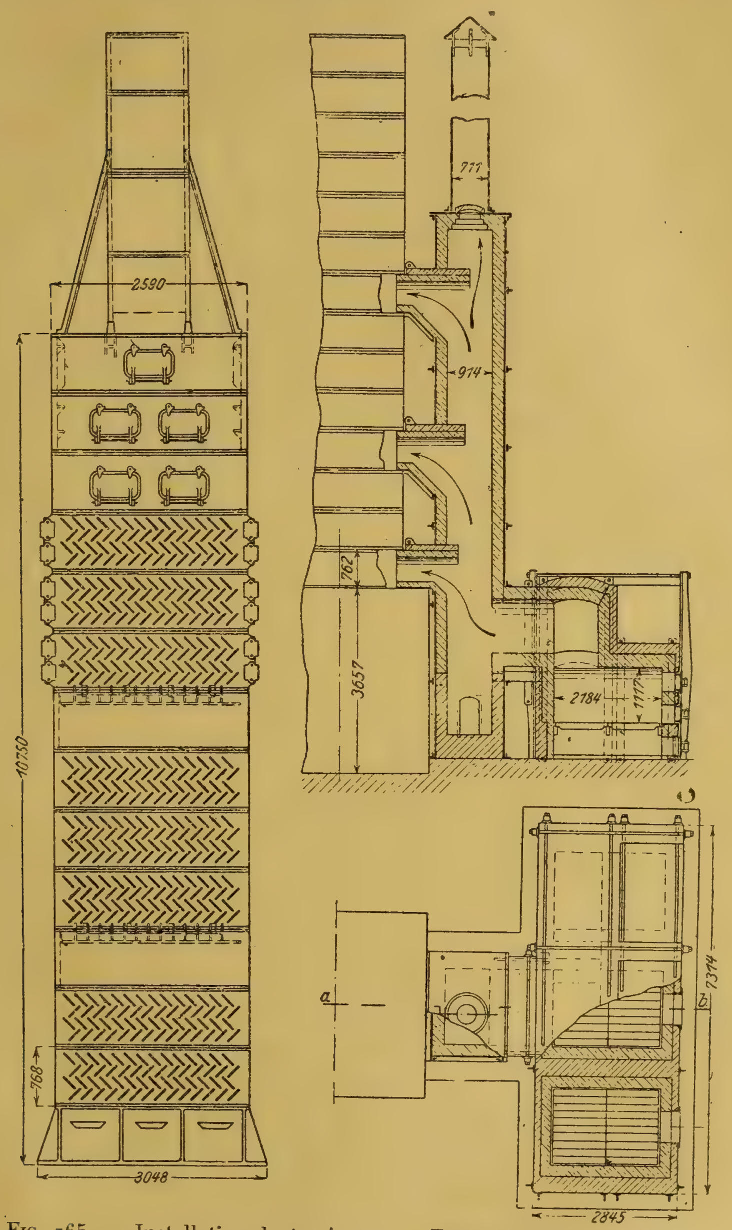


Fig. 165. — Installation du tamisage

Fig. 166 et 167. — Séchoir

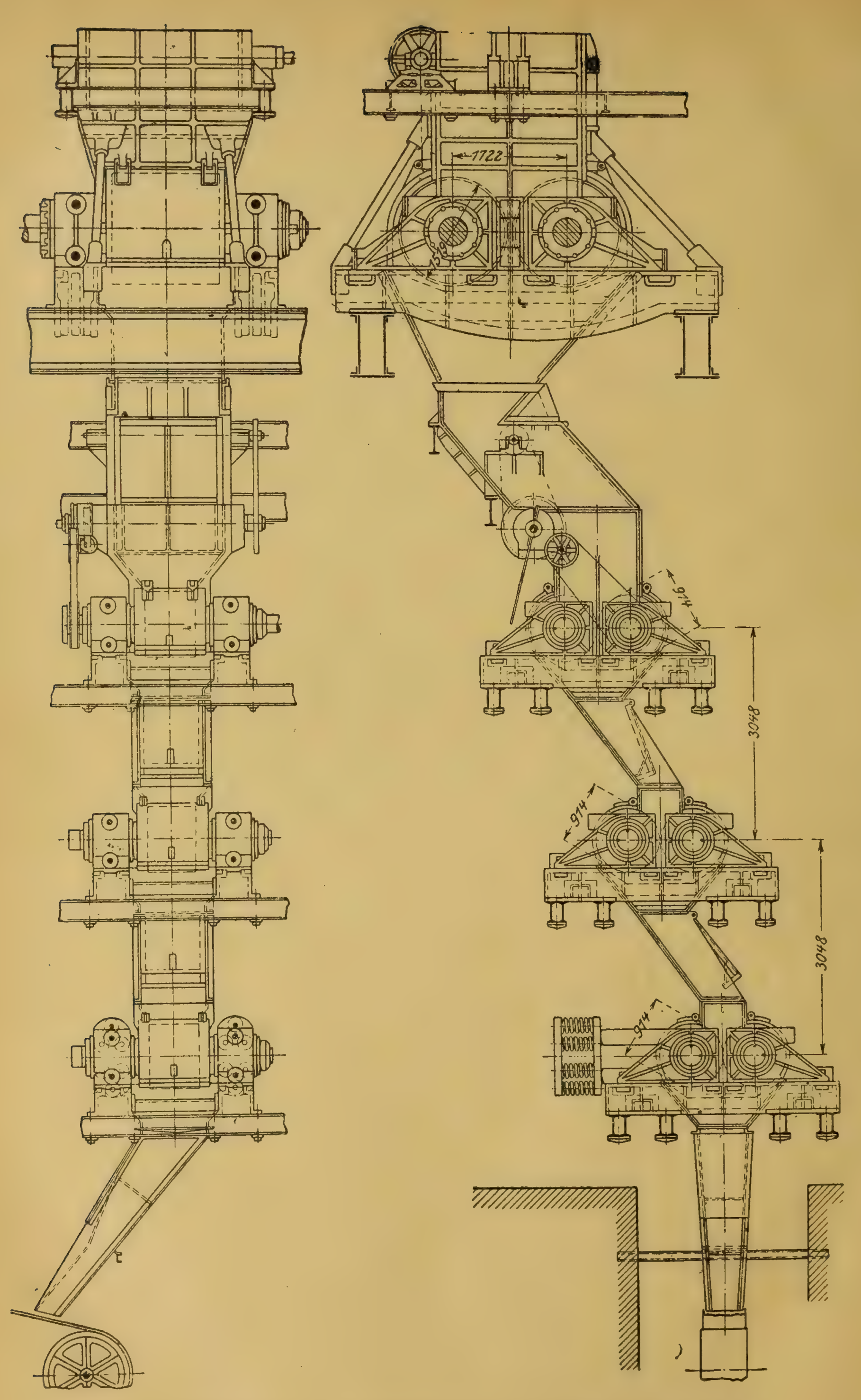


Fig. 168 et 169. — Vue de l'installation des broyeurs cylindriques à la fabrique de ciment de Newvillage

Les matières premières et le charbon pulvérisés sont amenés, des deux côtés, dans le bâtiment des fours où 2 fours sont installés. Ils se composent de 15 tronçons en fonte de fer de 2 m. 7 de diamètre moyen et ont 45 m. de long. Les matières premières sont introduites à l'extrémité la plus élevée pendant qu'à l'autre la poussière de charbon est injectée par intervalles, au moyen d'air sous pression et à 3 vitesses différentes, pour produire un feu vif à 3 endroits différents du four. Chaque four est supporté par 30 galets et reçoit un mouvement lent autour de son axe par un moteur électrique. La production journalière d'un four doit s'élever, dit-on, à 1.000 barils. Quoique en général ce soit possible, cela paraît douteux; la production obtenue de 750 tonneaux est déjà bien extraordinaire. Les clinkers tombent, à l'extrémité inférieure du four, dans un trommel refroidisseur construit comme le four, et la courroie transporteuse 15 les conduit au moulin à clinker, où la conduite du broyage est la même que dans le moulin à matières premières. Les morceaux de clinker, arrosés d'eau pendant leur transport, passent dans les silos *n*, puis se rendent au moulin *o*, au broyeur-séparateur à air *p*, pour finalement être emmagasinés dans un magasin construit pour 100.000 barils. Des vis transporteuses conduisent le ciment moulu à l'emballage *r*, où se trouvent 2 machines à remplir les barils et 4 machines à ensacher. En chemin, avant d'arriver au moulin à clinkers, ceux-ci sont additionnés d'une certaine quantité de plâtre.

Les nombreux moteurs électriques qui servent à actionner les transporteurs et les ventilateurs sont renfermés dans des chambres dont les parois sont en toile à sacs et dont l'air est continuellement aspiré. De cette façon les poussières ne viennent pas déranger les moteurs.

Remarquons l'installation de réservoirs entre 2 importantes phases de la fabrication. Ils sont assez grands pour qu'un arrêt de plusieurs heures dans la marche d'une partie quelconque de l'exploitation ne vienne pas gêner les autres.

CHAPITRE XIII

PROPRIÉTÉS DU CIMENT PORTLAND ET MÉTHODES D'ESSAI

Le ciment Portland est essentiellement un composé de chaux, de silice et d'oxyde de fer. Sa composition cependant est loin d'être nettement définie, et ne pourrait être exprimée par une formule invariable : elle varie dans certaines limites, assez étroites il est vrai, comme le montre le tableau de la page suivante qui donne la composition moyenne de 509 ciments analysés dans les années 1902 à 1907 au laboratoire de l'association des fabricants de ciment allemands (1).

L'analyse chimique permet de se renseigner sur la composition et, par suite, sur la valeur d'un ciment. Mais, pour connaître ses propriétés et la manière dont il se comporte à l'application, il est nécessaire de le soumettre à une série d'essais en se plaçant dans les conditions formulées par la Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction, commission instituée par décret en date du 9 novembre 1891.

Nous allons donc examiner les diverses déterminations que l'on a à effectuer et les méthodes et appareils prescrits à cet effet (2).

Il y a lieu de déterminer :

1° La pureté ;
2° Le poids spécifique ;
3° La densité apparente ;
4° La finesse de mouture ;
5° La prise ;
6° La résistance à la traction ;
7° La résistance à la compression ;
8° La porosité ;
9° La perméabilité ;
10° L'adhérence ;
11° L'invariabilité de volume.

(1) Dr Framm. — *Die Ergebnisse der Jahresprüjungen der Vereinszemente in den Jahren*, 1902-1907. — *Tonind. zeitung*. 1908.

(2) Les clichés qui figurent dans ce chapitre ont été mis à notre disposition par MM. Ponthus et Terrode, à Paris.

Comme la plupart des produits d'une certaine valeur, le ciment Portland est l'objet de nombreuses falsifications qui consistent surtout à y ajouter de l'argile, du sable, des cendres, et principalement des scories de haut-fourneau. Il est de l'intérêt de la fabrication loyale et honnête de lutter contre ces agissements.

De nombreuses méthodes ont été créées pour contrôler la pureté du ciment, c'est-à-dire pour déceler la nature et la quantité des matières étrangères ajoutées; ces méthodes ont leur valeur propre, mais il serait trop long de les décrire toutes. Nous nous contenterons de décrire celle qui a pour but de déceler l'addition des scories de haut-fourneau; cette méthode a été établie par l'association des fabricants de ciment allemands et est appliquée dans son laboratoire de Karlshorst près Berlin. Elle consiste, d'après le Dr Framm, à soumettre le ciment à des essais préliminaires, à en séparer et à identifier les matières étrangères.

A. *Essais préliminaires.* — Les essais préliminaires consistent :

a) A rechercher le soufre à l'état de sulfure par décomposition par l'acide chlorhydrique (Le dégagement de sulfure d'hydrogène indique la présence de scories de haut-fourneau).

b) A employer le permanganate de potasse dans le même but. (L'emploi d'une quantité normale de permanganate décèle également la présence de soufre et, par conséquent, de scories).

c) A soumettre à l'examen microscopique le ciment traversant le tamis à 5.000 mailles par cm². Les scories de haut-fourneau peuvent être distinguées aisément du ciment Portland avec lequel elles sont mélangées).

B. *Séparation des matières étrangères.* — Lorsque les essais préliminaires révèlent nettement la présence de scories de haut fourneau on fait leur dosage quantitatif comme suit :

On prépare un échantillon de ciment traversant le tamis à 5.000 mailles, on en sépare les impuretés métalliques à l'aide d'un électro-aimant, et on le débarrasse de la poussière adhérente par lavage à l'alcool. Le ciment est ensuite lavé à l'éther, séché et décomposé au moyen de solutions d'iodure de méthylène de densités, 3,05, 3,00, 2,95 et 2,70. On obtient ainsi cinq fractions :

1) Des particules plus lourdes que 3,05 (clinker de ciment Portland pur).

Composition des ciments

Valeurs maxima, minima et moyennes des analyses 1901-1907

Désignation	1902			1903			1904			1905			1906			1907		
	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne
Insoluble dans l'acide chlorhydrique p. %	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,62	0,21	1,23	8,15	0,37	1,75
Silice (SiO^2) p. %	26,37	19,27	22,71	28,82	20 05	22,44	26,40	20,00	22,47	26,53	19,09	22,39	24,53	16,63	21,15	24,04	17,23	20,56
Alumine (Al^2O^3) p. %	9.69	4,22	7,41	9,64	4,43	7,39	10,56	3,77	7,74	10,54	4,08	7,83	8,98	4,03	7,25	9,08	2,96	7,37
Fer (Fe^2O^3) p. %	4,53	0,65	2,77	5,99	0,69	3,01	3,98	0.69	2,65	3,75	0,80	2,51	4,64	0,77	3,07	4,62	1,23	3,24
Chaux (CaO) p. %	66,45	55,77	63,15	67,64	57,26	63,20	68,37	57,27	63,06	67,90	58.64	62,96	68,14	57,01	63,31	67,50	57,72	62,74
Magnésie (MgO) p. %	3,71	0,50	1,58	3,55	0,56	1,65	3,98	0,54	1,64	3,60	0,50	1,68	3,49	0 58	1,56	3,57	0,51	1,63
Acide sulfurique (SO^3) p. %	2.88	0,81	1,62	3,01	0,70	1,66	2,91	0,95	1,76	2,88	0,88	1.76	2,79	0,77	1,72	3.30	0,88	1,82
Soufre-sulfures p. %	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,37	0,00	0,13	0,61	0,00	0,07
Perte au feu p. %	5,29	0,45	2,51	6,78	0,95	2,52	6,76	0,89	2,61	7 86	0,36	2.60	5,26	0,64	2,55	7,32	0,94	2,87
Module hydraulique $\frac{SiO_2 + R_2O_3}{CaO}$ p. %	$\frac{1}{2,13}$	$\frac{1}{1,41}$	$\frac{1}{1,93}$	$\frac{1}{2,27}$	$\frac{1}{1,55}$	$\frac{1}{1,92}$	$\frac{1}{2,34}$	$\frac{1}{1,49}$	$\frac{1}{1,92}$	$\frac{1}{2,31}$	$\frac{1}{1,59}$	$\frac{1}{1.93}$	$\frac{1}{2,42}$	$\frac{1}{1,75}$	$\frac{1}{1,94}$	$\frac{1}{2,38}$	$\frac{1}{1,72}$	$\frac{1}{1,91}$

2) Des particules comprises entre 3,05 et 3,00 (ciment Portland non entièrement pur).

3) Des particules dont le poids spécifique est compris entre 3,00 et 2,95 (mélange de ciment Portland et de particules de scories).

4) Des particules dont le poids spécifique est compris entre 2,95 et 2,70 (scories pures de haut fourneau).

5) Des particules plus légères que 2,70 (charbon, scories de charbon, plâtre, etc.).

C. *Analyse des fractions.* — Dans les fractions 1) et 4) on recherche :

a) La perte à la calcination, la teneur en acide silicique, en sesqui-oxydes, en chaux, et l'insoluble dans l'acide chlorhydrique.

b) La teneur en soufre à l'état de sulfure.

Les dosages effectués en *a*) servent à caractériser les fractions (ciment Portland pur, scories pures).

Le dosage *b*) sert à la détermination quantitative des scories, qui exige en outre le dosage du soufre à l'état de sulfure dans le ciment livré. Les trois dosages du soufre :

Dans le ciment livré (α)

Dans le clinker de ciment Portland (β)

Dans les scories (γ)

permettent de calculer la teneur centésimale du ciment en scories non combinées de haut fourneau à l'aide de l'équation suivante :

$$x = 100 \frac{\alpha - \beta}{\gamma - \beta}$$

Si les essais préliminaires permettent de conclure à la présence de scories de haut fourneau, on détermine les autres impuretés qui se rencontrent notamment en proportions importantes dans les ciments naturels (scories de charbon et matières non solubilisées) en décomposant le produit traversant le tamis à 10.000 mailles par des solutions d'iodure de méthylène de densités 3,05, 3,00, 2,95, 2,70 et analysant les différentes fractions.

POIDS SPÉCIFIQUE

Le poids spécifique du ciment cuit convenablement est très élevé; il varie entre 2,5 et 3,25 pour le ciment scorifié. Contraire-

ment à une opinion très répandue autrefois, le poids spécifique ne peut nullement servir de base pour l'appréciation du degré de cuisson du ciment ni des falsifications. Il résulte, en effet, de nombreuses recherches faites à ce sujet que le poids spécifique du ciment faiblement cuit ne diffère pas sensiblement de celui du ciment légèrement surcuit, et que l'addition de ciment romain ou de scories de haut fourneau n'a pas pour effet de l'abaisser au-dessous du poids spécifique considéré comme normal.

Parmi les appareils employés pour la détermination du poids spécifique, nous n'en décrirons que deux, savoir : le volumenomètre de Schumann et celui de MM. Le Châtelier et Candlot.

La méthode de Schumann est basée sur la détermination du volume occupé par une quantité pesée de ciment ; elle consiste a placer le ciment dans un vase rempli d'essence de térébenthine et à observer la différence de niveau occupé ensuite par le liquide. Le volumenomètre se compose d'un vase d'une capacité de 100 à 150 cm³ surmonté d'un tube en verre d'une capacité de 40 cm³ et gradué en dixièmes de cm³. Pour procéder à l'opération on enlève le tube, on remplit le vase d'essence de térébenthine jusqu'au col, on essuie le col du vase et l'extrémité inférieure du tube avec du papier buvard, puis on fixe le tube dans le col, et on y verse à l'aide d'une burette de l'essence de térébenthine jusqu'à l'affleurement du zéro. Ensuite, à l'aide d'un entonnoir placé sur le tube, on y verse par portions successives 100 gr. de ciment exactement pesé à un milligramme près, en ayant soin de ne pas laisser s'engorger le tube.

Le ciment descend dans le liquide, l'air qui y était emmagasiné se dégage aussitôt et l'essence s'élève dans le tube au fur et à mesure que le ciment la déplace dans le vase. Lorsque tout le ciment est introduit, on bouche le tube avec un bouchon de liège (pour empêcher l'évaporation pendant que s'effectue le dépôt) et on laisse le liquide se clarifier suffisamment pour permettre la lecture du niveau (ménisque inférieur), ce qui exige environ 10-15 minutes, puis on note le niveau du liquide. En divisant le chiffre observé par le nombre de cm³ on obtient le poids spécifique.

Pour éviter les erreurs, il est nécessaire de conserver ensemble le ciment, l'appareil et l'essence de térébenthine pendant un certain temps dans le local où se fait l'essai afin qu'ils soient à la mê-

me température et que celle-ci ne soit pas exposée à varier au cours de l'essai.

L'instrument établi par MM. Le Châtelier et Candlot comprend une fiole de 120 cm³ de capacité, surmontée d'un col étroit de 20 cm³ de longueur. A la partie supérieure on voit un renflement contenant 20 cm³. Ce renflement est compris entre deux traits marqués sur l'appareil. C'est le volume compris entre ces deux traits qui correspond à 20 cm³. Le col porte une graduation qui commence au trait supérieur et qui se continue sur 3 cm³ par 1/10 de cm³. La longueur qui sépare le renflement de la fiole est de 10 cm. et le diamètre du col de 0 cm. 9 environ.

Fig. 170. — Volumenomètre de Le Chatelier et Candlot.

Les auteurs (1) indiquent deux manières d'opérer :

1° D'après la première on remplit la fiole de benzine jusqu'au trait inférieur, puis, après avoir pesé exactement 64 gr. de poudre, on introduit celle-ci dans la fiole à l'aide d'un entonnoir; la tige de l'entonnoir descend dans le col de l'appareil jusqu'à quelques millimètres au-dessus du premier trait ; de cette façon la poudre en tombant ne peut pas s'agglomérer sur les parois du col et l'obstruer. D'autre part, les deux traits étant très voisins du renflement, il n'y a jamais à craindre que l'introduction de la poudre dans la fiole soit arrêtée par suite d'une obstruction du tube au-dessus de la benzine, comme cela se produit avec le volumenomètre de Schumann.

Quand le niveau de la benzine approche du trait supérieur, on verse la poudre avec précaution et par très petites quantités à la fois ; on continue jusqu'à ce qu'on ait obtenu l'affleurement. On pèse ce qui reste de poudre ; le poids trouvé est retranché des 64 gr., et la différence représente le poids de poudre contenu dans 20 cm³ ; en divisant le poids par 20, on a la densité cherchée.

2° Dans la seconde méthode l'opération s'exécute de la même manière que précédemment, mais au lieu d'arrêter de verser la poudre quand la benzine affleure au trait supérieur du col, on l'introduit en totalité dans l'appareil ; le niveau de la benzine atteint une des divisions comprises entre 0 et 3 cm³, on a ainsi un

(1) Candlot. — *Ciments et chaux hydrauliques*, 1906, p. 263.

poids de poudre dans 20 cm^3 + n°, 1 cm. et on divise ce poids par le volume observé.

En suivant la première méthode, on peut toujours prendre 64 gr. de poudre, quel que soit l'agglomérant à essayer. Dans la seconde on doit proportionner le poids à la densité probable du produit.

Comme la densité des ciments varie de 2,8 à 3,25, on choisira les poids suivants : 64 gr. pour les ciments Portland dont la densité est supérieure à 3 ; 60 gr. pour les ciments naturels, les ciments de grappier et les ciments de laitier ; 57 gr. pour les produits ayant une densité inférieure à 2,7.

On maintient la fiole dans l'eau pendant toute la durée de l'expérience, on évite ainsi les erreurs dues aux variations de température. Il est nécessaire que les affleurements soient faits bien exactement en ayant un ménisque tangent au trait. Les bulles d'air sont expulsées complètement sans que l'on ait à toucher à l'appareil, grâce à la grande hauteur de benzine que la poudre doit traverser.

A la benzine on peut substituer l'huile minérale. Le ciment doit être employé bien pulvérulent, on le passera au tamis de 900 mailles par centimètre carré. S'il se formait des grumeaux, on les écraserait et on les forcerait à traverser le tamis.

Le D[r] Framm indique (1) les poids spécifiques moyens suivants pour les échantillons examinés :

Poids spécifiques des ciments en l'état où ils ont été livrés

Limites	Nombre d'échantillons examinés						Totaux
	1902	1903	1904	1905	1906	1907	
2,85-2,90	—	—	—	2	—	1	3
2,90-2,95	—	—	—	4	2	1	7
2,95-3,00	10	—	9	10	9	8	46
3,00-3,05	38	—	34	37	29	29	106
3,05-3,10	30	—	43	24	34	34	154
3,10-3,15	2	—	6	5	10	10	39
3,15-3,20	—	—	—	—	—	—	3
Nombre d'échantillons examinés							539

(1) *Loc. cit.*

Poids spécifique des ciments après calcination : 1902-1907

3,00-3,05	—	1	1	—	1	—	3
3,05-3,10	2	10	1	—	—	1	14
3,10-3,15	55	37	38	26	14	8	178
3,15-3,20	19	38	46	44	43	51	241
3,20-3,25	4	5	6	12	22	23	72
3,25-3,30	—	—	—	—	1	—	1
Total des échantillons examinés							509

Le poids spécifique des ciments examinés avant calcination a été en moyenne de 3,039, et de 3,162 pour les ciments après calcination. Il ressort de ces chiffres que le poids spécifique des ciments après calcination a augmenté sensiblement au cours des dernières années.

DENSITÉ APPARENTE

Pour faire cette détermination, la Commission des méthodes d'essai a adopté un modèle d'entonnoir qu'elle appelle *entonnoir à tamis*. Voici d'ailleurs ses conclusions :

a) On déterminera la densité apparente d'un ciment en pesant une mesure de forme cylindrique ayant un litre de capacité et 0 m. 10 de hauteur, rempli au moyen de l'entonnoir à tamis.

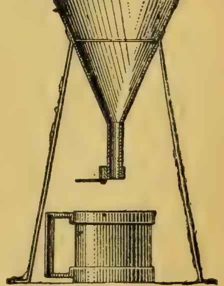


Fig. 171. — Appareil pour la prise de la densité apparente.

b) Cet appareil se compose d'un entonnoir vertical, dont la section circulaire a 0 m. 02 de diamètre à la base et 0 m. 15 de diamètre à une hauteur de 0 m. 15 au-dessus de cette base, hauteur à laquelle est placée une tôle perforée ayant, par décimètre carré, 1.050 trous environ de 0 m. 002 de diamètre (cette tôle se trouve dans le commerce). L'entonnoir se prolonge par un ajutage cylindrique de 0 m. 02 de diamètre et 0 m. 10 de hauteur. L'appareil est supporté par un bâti en forme de trépied.

c) On placera tout d'abord la mesure à 0 m. 05 en contre-bas de l'extrémité inférieure de l'ajutage.

On versera ensuite le ciment dans l'entonnoir, par petites masses de 300 à 400 gr., que l'on fera passer par le tamis en y promenant une spatule en bois de 0 m. 04 de largeur.

On arrêtera le remplissage quand la base du cône qui se sera

élevée peu à peu au-dessus de la mesure aura atteint le bord supérieur. On enlèvera alors l'excès de ciment, en faisant glisser sur ce bord une lame bien droite, tenue dans un plan vertical.

Pendant toute l'opération, on n'aura fait subir à la mesure aucune trépidation ni autre choc.

d) On adoptera comme poids du litre la moyenne des résultats obtenus dans cinq opérations successives.

e) Il est utile de faire porter les essais sur le ciment tel qu'il est livré, et sur la fine poussière ayant passé au tamis de 4.900 mailles. Dans tous les cas on indiquera, en même temps que la densité apparente, le degré de finesse de mouture de l'échantillon sur lequel on aura opéré.

FINESSE DE MOUTURE

Le ciment doit être moulu finement. Plus la mouture est fine, plus le ciment est avantageux, car sa combinaison avec l'eau est d'autant plus intime qu'il lui offre des points d'attaque plus nombreux, une surface de contact plus grande. En effet, seules les particules très fines du ciment prennent part à la réaction et produisent ensuite la solidification, tandis que les gros grains ne sont attaqués que superficiellement. En outre, les grains fins se fixent d'une manière plus intime et plus serrée sur les grains de sable, d'où résulte une adhérence plus forte et une solidité plus grande du ciment après durcissement.

Au début de la réaction les gros grains de ciment n'agissent pas autrement que les grains de sable, et ce n'est qu'après un temps très long qu'ils entrent peu à peu en combinaison ; par conséquent, plus un ciment renferme de gros grains, moins il a de valeur.

Les ciments riches en alumine ou mal fabriqués sont particulièrement faciles à broyer ; mais, malgré la finesse du grain, ils n'en sont pas moins inférieurs aux ciments de grains plus gros, bien cuits. Par conséquent, la finesse de la mouture ne fournit pas à elle seule un critère sûr de la bonne qualité d'un ciment.

Essai normal. — *a*) Pour déterminer la finesse de mouture des ciments, on fractionnera l'échantillon en quatre lots à l'aide de trois tamis à mailles carrées définis ci-après :

1° Tamis de 324 mailles, soit 18 par cm. linéaire, avec fils de 0 mm. 20 de diamètre (largeur des côtés des jours 0 mm. 36).

2° Tamis de 900 mailles, soit 30 par centimètre linéaire, avec fils de 0 mm. 15 de diamètre (largeur des côtés des jours 0 mm 18).

3° Tamis de 4.900 mailles, soit 70 par centimètre linéaire, avec fils de 0 mm. 05 de diamètre (largeur des côtés des jours 0 mm.09).

b) Les essais auront lieu sur un échantillon de 100 gr.

c) Le tamisage à la main sera considéré comme terminé lorsqu'il passera moins de 0 gr. 1 de matière sous l'action de vingt-cinq tours de bras.

d) L'emploi d'une machine à secousses est recommandé pour éliminer rapidement la plus grande partie de la plus fine poussière.

e) Le tamisage complet à la machine est également recommandé, mais il ne peut faire l'objet d'une prescription tant que les conditions auxquelles doit satisfaire la machine ne sont pas rigoureusement arrêtées.

f) On exprimera les résultats, pour chaque tamis, en totalisant les résidus qui ne sont pas susceptibles d'y passer.

Les tableaux suivant nous montrent les finesses obtenues en Allemagne, d'après le Dr Framm (1) :

Finesse de mouture — Refus sur tamis à 900 mailles

Limites 0/0	Nombre d'échantillons examinés						Totaux
	1902	1903	1904	1905	1906	1907	
0- 1,0	28	39	41	22	25	26	181
1,0- 2,0	23	25	30	27	31	37	173
2,0- 3,0	19	20	14	19	11	10	93
3,0- 4,0	9	5	5	8	10	6	43
4,0- 5,0	—	1	2	1	2	3	9
5,0- 6,0	1	1	—	2	–	—	4
6,0- 7,0	—	—	—	2	1	—	3
7,0- 8,0	—	—	—	—	1	—	1
8,0- 9,0	—	—	—	—	—	—	—
9,0-10,0	—	—	—	—	—	—	1
10,0-11,0	—	—	—	—	—	—	1
Total des échantillons examinés							509

(1) *Loc. cit.*

On voit que la majeure partie des ciments ne donnent qu'un refus compris entre o et 3 %. Sur 509 échantillons examinés, 447, soit 87,8 % donnent au maximum 3 % de refus sur le tamis à 500 mailles. Les ciments donnant 3 à 4 % de refus sont très rares, ceux donnant 4 % de refus ne se rencontrent qu'exceptionnellement.

Finesse de mouture — Refus sur tamis à 5.000 mailles

Limites 0/0	Nombre d'échantillons examinés						Totaux
	1902	1903	1904	1905	1906	1907	
5-10................	—	—	—	—	2	2	4
10-15................	2	2	5	7	9	10	35
15-20................	18	28	23	18	29	30	146
20-25................	34	29	41	40	29	32	205
25-30................	20	28	19	13	10	7	97
30-35................	6	3	4	4	2	—	19
35-40................	—	1	—	1	—	1	2
40-45................	—	—	—	—	—	1	1
Total des échantillons examinés.........							509

On voit que 351 échantillons sur 509, soit 68,9 %, ont donné un résidu de 15-25 % sur le tamis de 5.000 mailles, et que la finesse de la mouture est en progression sensible.

PRISE DU CIMENT

On appelle prise la solidification du ciment gâché avec de l'eau, et temps de prise le temps que met le ciment pour durcir au point de résister à la pression de l'ongle.

On distingue les ciments à prise lente, c'est-à-dire ceux qui exigent au moins une heure pour se solidifier, et les ciments à prise rapide, qui durcissent beaucoup plus vite. Les matières premières riches en silice donnent généralement des ciments à prise lente, celles riches en oxyde de fer et alumine donnent des ciments à prise plus rapide ; le fabricant possède donc le moyen de fabriquer l'une ou l'autre sorte. Les fabricants de ciment fournissent les sortes suivantes : 1° les ciments pour coulée dont le temps de prise ne dépasse pas 5 minutes et qui sont employés pour la confection du béton servant à boucher les arrivées d'eau,

etc. ; 2° les ciments à prise rapide (15 à 20 minutes) pour façades et revêtements ; 3° les ciments à prise normale (1 à 3 heures) et 4° ceux à prise lente (3 à 12 heures).

Les ciments cuits faiblement sont généralement à prise rapide; cependant, il n'est pas rare de trouver des ciments fortement cuits dont la prise est également rapide.

Les roches de ciment Portland sont toujours à prise *instantanée* au moment de leur défournement. Aussi, est-ce une erreur de croire que les anciens fours produisaient des roches dont le ciment, après pulvérisation, était à prise lente. La prise est rendue lente par suite soit de l'arrosage copieux auquel on procède aussitôt le défournement, soit par une addition de plâtre, soit par exposition du ciment à l'air.

Le premier et le dernier procédés ont l'inconvénient de diminuer les qualités du ciment, tandis qu'une addition d'une faible quantité de plâtre n'offre — tout au moins pour les emplois à l'eau douce — aucun inconvénient.

Comme l'a montré M. Leduc, au lieu d'une addition de plâtre crû, il est préférable d'ajouter du gypse cuit à basse température (200 à 250°) qui, plus soluble que le gypse non cuit ou le plâtre cuit à une température plus élevée, a une action plus énergique sur la prise.

Il résulte des essais publiés par cet auteur (1), qu'avec 1 à 2 % de gypse déshydraté à basse température (200° environ), il est possible d'employer immédiatement des clinkers sortant du four rotatif ou du four droit.

Les facteurs qui influent sur la prise du ciment sont : la température de l'air et celle de l'eau employée à la confection du mortier de ciment. L'air chaud et sec la favorise, le froid et l'humidité la retardent; le mortier très épais durcit plus rapidement que le mortier délayé.

Certaines substances, mélangées même en petites quantités au mortier, possèdent la propriété d'influer sur le temps de prise; ainsi, les alcalis donnent lieu à une prise rapide, tandis que le sulfate de chaux (gypse) la ralentit.

D'après la méthode prescrite par la *Commission des méthodes*

---

(1) Réunion des membres français et belges de l'Association internationale pour l'essai des Matériaux. (Séance du 31 octobre 1908).

d'essais, il faut, pour déterminer la prise d'un ciment, préparer une pâte normale..

On confectionne cette pâte normale en étalant sur une table de marbre 1 kg. de ciment. On fait une couronne au centre de laquelle on verse le volume d'eau nécessaire. On gâche à la truelle pendant cinq minutes comptées à partir du moment où l'eau a été versée.

Avec une partie de la pâte obtenue on emplira immédiatement une boîte métallique à fond plat de forme tronconique ayant 8 cm. de diamètre à la base et 9 cm. à la base supérieure avec 4 cm. de profondeur. On lissera la surface en faisant glisser la truelle sur le bord supérieur du moule et en évitant tout tassement et toute trépidation.

S'il s'agit de ciments à prise rapide, on réduira à 500 gr. la prise de matière.

La mesure du durcissement initial d'un ciment se faisait tout d'abord par l'épreuve au pouce. On notait au bout de combien de temps après le gâchage il n'était plus possible de réaliser un enfoncement appréciable du pouce en pressant fortement une galette de ciment.

Ce procédé sommaire a été remplacé par l'épreuve à l'aiguille de Vicat. L'appareil se compose d'une tige verticale cylindrique ayant 1 mm² de section et pesant 300 gr. La surface de base de l'aiguille est perpendiculaire à l'axe et l'aiguille est maintenue verticale par un support convenable. En laissant descendre cette aiguille sur la bouillie de ciment, sans vitesse préalable, on verra qu'elle s'enfonce plus ou moins dans la pâte.

Le *début de la prise* est l'instant où cette aiguille, descendue normalement à la surface de la pâte, ne peut plus pénétrer jusqu'au fond de la boîte. La *fin de la prise* est l'instant à partir duquel la surface de la pâte peut supporter la même aiguille sans que celle-ci y pénètre d'une quantité appréciable.

On considère en France que la pâte est normale, quand l'aiguille ne peut plus s'enfoncer qu'à 6 mm. du fond. C'est à partir de ce moment que l'on compte le temps de prise.

Etant donné que l'eau chaude accélère la prise et que l'eau froide la retarde, les températures du ciment, de l'eau et de l'air devront être comprises entre 15 et 18°.

On a adopté en Suisse et en Allemagne des prescriptions dites

normales qui diffèrent un peu des précédentes. M. Tetmayer indique de brasser la pâte pendant 3 minutes pour les produits à prise lente et demi-lente et une minute pour les produits à prise rapide. Il indique de se servir, en même temps que de l'aiguille de Vicat, d'un cylindre métallique de 1 cm. de diamètre et du poids de 300 gr. Après avoir lissé la pâte on y introduit avec soin le cylindre servant à mesurer la consistance. S'il reste suspendu d'environ 5 mm. au-dessus de la surface inférieure du moule, on peut considérer la pâte comme normale.

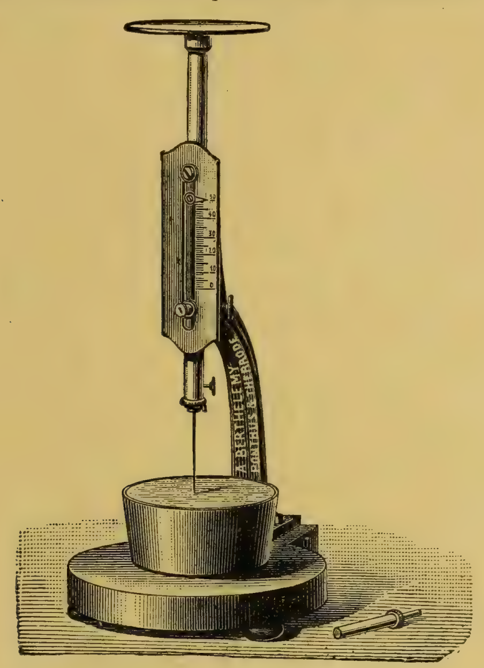


Fig. 172. — Aiguille de Vicat

La prise du ciment est accompagnée d'un dégagement de chaleur sensible, surtout avec les ciments à prise rapide : aussi recommande-t-on de les laisser dans un récipient plein d'eau à 15° pour empêcher l'élévation de température pendant les mesures.

La distinction entre le commencement et la fin de la prise n'a pas toujours la précision suffisante, car les nombres obtenus varient souvent fortement (du simple au double), sans qu'on puisse en prévoir les raisons.

M. Laborde a proposé d'appliquer aux ciments la méthode de

la bille employée par Brinell pour étudier la dureté des métaux. Pour cela on prend des billes de 50 mm. de diamètre que l'on enfonce avec une grosse aiguille de Vicat ayant de 10 à 20 mm. de diamètre. On charge l'ensemble de l'appareil à 1 kg.

La surface de l'essai est bien aplanie et lissée à l'aide d'une plaque de verre qu'on place au-dessus de la pâte lors du remplissage. Avec ce dispositif on peut varier la charge et l'augmenter à volonté. L'auteur propose pour les essais à 7 jours de charger à 5 kg. Il considère la prise comme commencée quand le diamètre de l'empreinte est inférieur à 15 mm. ; la prise est finie quand ce diamètre descend au-dessous de 10 mm. Les résultats obtenus paraissent satisfaisants ; ils n'ont pas laissé voir d'influence occasionnée par le gâchage.

En Allemagne on suit une marche un peu différente. On remue le ciment pur, à prise lente, pendant trois minutes avec de l'eau. S'il s'agit de ciment à prise rapide, le gâchage ne dure plus qu'une minute. On en fait une bouillie épaisse dont on forme un gâteau en l'appliquant sur une plaque de verre. On lui donne une épaisseur de 1 cm. 5 en l'amincissant sur les bords.

Il faut pour cela avoir un mélange assez clair pour que la pâte appliquée sur le verre à la spatule puisse couler vers les bords quand on remue la plaque. On arrive à ce résultat avec 27 à 30 % d'eau de gâchage.

Dès que le gâteau s'est modifié, c'est-à-dire qu'il présente une légère résistance à l'ongle, on peut considérer la prise comme terminée.

Dans la plupart des cas on ne sait si l'on a affaire à un ciment à prise rapide ou à prise lente. Le mieux est alors de gâcher tous les ciment pendant trois minutes. Ceux qui font prise en moins de deux heures sont soumis à une nouvelle expérience. A cet effet, on gâche le ciment pendant une minute et demie et non une minute, car l'expérience a appris qu'il n'était pas possible à un ouvrier exercé de gâcher régulièrement 300 à 400 gr. de ciment en une minute avec de l'eau.

Pour obtenir des résultats comparables, il est nécessaire d'employer exactement une même quantité de ciment dans chaque expérience.

Le gâchage se fait dans un vase en fer blanc avec une cuiller de même matière; on peut encore se servir d'un pot émaillé à fond poli et d'un couteau un peu court.

Pour travailler toujours dans les mêmes conditions, on mélange 300 gr. de ciment avec assez d'eau pour que la masse prenne par une agitation rapide la consistance d'un sirop. Il faut qu'elle coule encore de la spatule en formant de longs fils, sans pelotes. Cette consistance est tout à fait nette et, avec quelque habitude, on arrive à déterminer à 0,5 % près la quantité d'eau à ajouter. En général le ciment Portland en exige de 32 à 38 %. Il est rare que l'on franchisse ces limites.

Appelons *n la* quantité d'eau requise pour obtenir la consistance cherchée. Elle sert de base pour l'estimation de la quantité d'eau nécessaire pour l'essai de résistance à la rupture.

On continue à ajouter à la bouillie sirupeuse du ciment en poudre par petites quantités, en remuant toujours, jusqu'à ce que la masse ne tienne plus aux parois du vase et prenne un éclat brillant. On a alors atteint la consistance voulue et la masse forme un gâteau épais que l'on porte sur une plaque de verre mesurant 15 × 15 cm. à l'aide de la spatule qui a servi à remuer le tout; on étale cette pâte.

L'expérience a appris que les gâteaux à bords minces ne donnaient pas des résultats acceptables dans tous les cas qui se présentent ; l'emploi de l'ongle comme réactif, en quelque sorte, permettant une grande latitude à l'observateur, on n'utilise les gâteaux ainsi obtenus que pour la détermination de la constance du volume; pour déterminer le temps de prise, on a recours à l'aiguille de Vicat.

La détermination exacte du temps de prise et l'établissement du commencement de la prise, qui a son importance pour les ciments à prise rapide, se fait avec l'aiguille de Vicat déjà décrite.

La pâte est introduite dans un anneau métallique posé sur une plaque de verre. Cet anneau a 4 cm. de hauteur et 8 cm. de diamètre.

Les déterminations du commencement de la prise et du temps de prise correspondent, comme plus haut, au moment où l'aiguille ne peut aller jusqu'au fond du gâteau et au moment où elle ne laisse plus aucune empreinte sur le gâteau solidifié.

Au lieu de l'anneau métallique on peut se servir d'un anneau en caoutchouc durci, formé de deux parties réunies par un ruban d'acier fermé par un crochet ou quelquefois encore d'un seul morceau.

Le tableau suivant, extrait du rapport du Dr Framm (1), donne les temps de prise moyens fournis par les ciments analysés pendant les années 1902 à 1907 :

Temps de prise

Limites (heures)	Nombre d'essais						Totaux
	1902	1903	1904	1905	1906	1907	
0- 2	8	7	9	7	7	3	41
2- 4	11	5	3	3	6	6	34
4- 6	15	9	7	6	10	11	58
6- 8	25	21	20	45	31	29	171
8-10	10	31	26	18	23	30	138
10-12	9	15	15	3	3	4	49
12-14	2	1	10		1	—	14
14-16	—	—	2	—	—	—	2
16-18	—	2	—	—	—	—	2

Pour 367 échantillons sur 509 = 72 %, le temps de prise varie de 4 à 10 heures. Les ciments à temps de prise rapide et moyen sont nombreux ; ceux à prise très lente sont relativement rares.

Quoi qu'il en soit, il n'est pas difficile de fabriquer des ciments qui soient à prise lente ou à prise rapide suivant les besoins. La seule difficulté consiste à les fabriquer de manière qu'ils ne soient pas influencés par la conservation et qu'ils conservent les propriétés voulues jusqu'au moment de leur emploi. Comme la science n'est pas en état de fournir une explication plausible, valable pour tous les cas qui se présentent, des changements curieux qui se produisent parfois dans les ciments, c'est au fabricant à se tirer d'affaire en étudiant soigneusement les propriétés des matières qu'il met en œuvre.

RÉSISTANCE A LA TRACTION ET A LA FLEXION

Lorsque le ciment a achevé sa prise, il commence à se durcir aussi bien sous l'eau qu'à l'air libre. Dans les premiers temps sa solidité augmente rapidement ; elle s'effectue ensuite à une allure plus lente et n'atteint généralement sa limite extrême qu'au bout de quelques années. Il acquiert plus de solidité à l'air libre

(1) *Loc. cit.*

que sous l'eau, en supposant toutefois qu'il ait été maintenu à un état d'humidité suffisante dans les premiers jours ; il acquiert son maximum de solidité lorsqu'il se solidifie alternativement à l'air et sous l'eau.

Tous les ciments sont loin de se comporter de la même manière dans cette circonstance, de sorte que le contrôle de la résistance exige une période de temps assez longue. Aussi les normes allemandes prescrivent-elles une durée minima de 28 jours pour le contrôle de la résistance. L'expérience montre qu'au bout d'un an cette résistance est exactement de 1 fois $\frac{1}{2}$ celle qu'on avait constatée au bout de 28 jours.

On ne sait encore exactement rien de ce qui se passe dans le ciment pendant la période de durcissement. On peut affirmer qu'il existe sur ce point autant de théories qu'il y a de savants qui s'en sont occupés ; mais, comme ces théories se ressemblent toutes en ce sens qu'elles paraissent également vraisemblables, il nous paraît inutile de les énumérer ici ; le lecteur les trouvera d'ailleurs exposées tout au long dans les périodiques spéciaux. Ce que l'on peut affirmer, c'est que : 1° une partie de la chaux se transforme en carbonate pendant le durcissement ; 2° que le ciment Portland combine de l'eau chimiquement en se durcissant ; 3° qu'en se durcissant sous l'eau, il abandonne à celle-ci des alcalis et de faibles quantités de chaux et de silice.

On avait d'abord mesuré la résistance à la traction sur des éprouvettes de formes et de sections variées. La *Commission des méthodes d'essais* a étudié la forme géométrique et les dimensions à donner à l'éprouvette : celle-ci a la forme d'un 8 (*fig.* 173) sa section au milieu est de 5 cm².

On prépare ces éprouvettes en ciment pur en se conformant aux prescriptions indiquées pour les essais de prise. Les *essais normaux* se font avec du sable naturel de la plage de Leucate (Aude), dit *sable normal*, que l'on emploie de deux manières différentes.

Le sable normal *simple* est formé de grains ayant traversé un tamis en tôle perforée dont les trous ont 1 mm. 5 de diamètre et ont été retenus par le tamis à trous de 1 mm. Le sable normal *composé* est constitué par un mélange à poids égaux de :

1° Sable à grains acceptés par le tamis de 1 mm. et refusés par celui de 0 mm. 5 ;

2° Sable à grains acceptés par le tamis de 1 mm. 5 et refusés par celui de 1 mm ;

3° Sable à grains acceptés par le tamis de 2 mm. et refusés par celui de 1 mm. 5.

Les essais *normaux* sont faits avec un mortier composé de 1 partie de ciment et 3 parties de sable. On opère sur 1 kg. de matières que l'on mélange intimement à sec. Ensuite, sur une table de marbre, on fera une couronne au centre de laquelle on versera, d'un seul coup, la quantité d'eau à employer et le mélange sera gâché fortement à la truelle pendant 5 minutes.

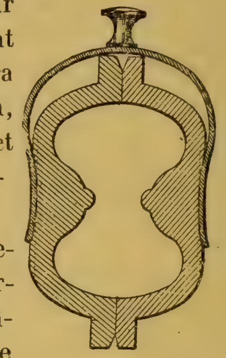


Fig. 173. — Moule pour éprouvettes

Les essais effectués sur mortier *normal sec* seront faits sur un mélange de ciment et sable normal *simple*. La quantité d'eau employée au gâchage sera de 45 gr. augmentée du sixième de celle nécessaire pour amener 1 kg. de ciment à l'état de pâte normale de ciment.

Pour les essais effectués sur mortier normal *plastique* on emploiera du sable normal *composé*. La quantité d'eau employée au gâchage sera telle que le mortier obtenu ait une consistance plastique. Dans un grand nombre de cas, cette quantité est celle qui est nécessaire pour confectionner le mortier normal sec augmentée de 15 grammes.

Pour s'assurer que cette consistance est bien réalisée, on emplira, avec une partie du mortier obtenu, la boîte métallique destinée aux essais de consistance. On lissera la surface à la truelle et la consistance sera jugée satisfaisante si, après le lissage, le mortier ressue légèrement sous l'effet de quelques coups de truelles frappés sur les côtés de la boîte.

Pour les ciments à prise rapide, on réduit la prise de manière à n'opérer que sur 500 gr. Le gâchage ne doit plus durer qu'une minute.

Les essais de mortier autres que les essais normaux devront être effectués de préférence sur des mélanges de 1 partie de ciment et de 2 de sable normal pour les mortiers riches, et 1 partie de ciment et 5 de sable normal pour les mortiers maigres. Le premier de ces dosages est particulièrement utile pour les ciments à prise

rapide en vue de compléter les renseignements fournis par le mortier normal 1 : 3.

La question du tassage du ciment dans les formes est délicate. Pour l'obtenir avec une spatule, il faut une certaine habileté. D'après Candlot, Guillain aurait indiqué le mode opératoire suivant :

Ayant placé sur un support inébranlable une plaque de marbre ou de métal poli, on y déposera les moules préalablement nettoyés et humectés. On pèsera 125 gr. de ciment et 375 gr. de sable que l'on mélangera intimement à sec dans une capsule avec une spatule. On y ajoutera la quantité d'eau nécessaire (soit 60 cm^3), puis on remuera fortement toute la masse avec la spatule pendant cinq minutes, comptées à partir du moment où l'eau aura été versée. On obtiendra ainsi un mortier ayant l'aspect de la terre humide fraîchement remuée. Ce mortier sera introduit d'une seule fois dans les moules en quantité suffisante pour qu'il fasse encore saillie au-dessus des bords après le damage.

On damera le mortier dans le moule avec une petite massette du poids de 200 gr. environ, d'abord à petits coups répétés sur le pourtour de la briquette, puis au centre, on frappera ensuite plus énergiquement en suivant toujours le même chemin, et on continuera le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et sue l'eau à la surface. On enlèvera le trop plein du moule avec une lame de couteau bien droite, et on lissera la surface en promenant le couteau appuyé sur les bords du moule.

On peut obtenir une régularité et une compacité beaucoup plus grandes en comprimant le mortier dans le moule à l'aide d'un pilon. Pour y parvenir, on place sur le moule un guide de 15 cm. de hauteur. Ce guide est creux et offre intérieurement une surface correspondant à celle de l'éprouvette. Il est maintenu par deux fourches qui s'encastrent dans les extrémités saillantes du moule ; on peut le retirer et le placer avec facilité. Dans ce guide on fait glisser un pilon qui a une surface un peu moindre que la briquette.

Pour préparer une éprouvette, on mesure ou pèse une quantité déterminée de mortier qu'on jette dans le moule après avoir placé le guide. On pilonne doucement d'abord, puis plus énergiquement lorsque la matière est tassée. La proportion d'eau à employer est généralement de 10 % de celle du mortier.

Ce procédé, plus sûr que le précédent, n'a pas été adopté par la commission des essais, qui recommande : 1° d'opérer sur six moules à la fois quand il s'agit de ciment à prise lente, et sur quatre quand il s'agit de ciment à prise rapide. On doit mettre suffisamment de matières pour remplir avec excès les moules. On tasse avec le doigt pour ne laisser aucun vide et on frappe quelques coups de truelle sur les côtés du moule pour compléter le tassement et faciliter le dégagement des bulles d'air. On écrase en faisant glisser une lame de couteau bien droite sans exercer aucune compression. On lisse ensuite.

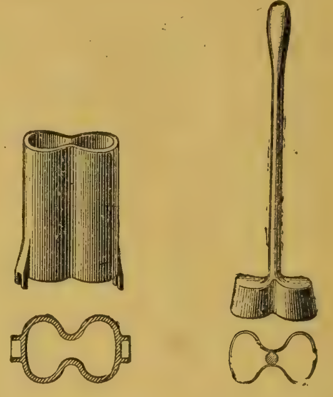


Fig. 174. — Guide que l'on applique sur le moule pour éprouvettes.

Fig. 175. — Pilon pour tasser le ciment dans le moule pour éprouvettes.

2° Le démoulage s'opérera en faisant glisser les moules sur la plaque, en les desserrant et les éloignant des éprouvettes sans les soulever. Ces moules sont faits en deux parties réunies par une charnière et s'ouvrent facilement (*fig.* 173). On attend 24 heures, comptées à partir du gâchage, pour démouler, et moins si la prise est certainement terminée (1 heure pour les ciments à prise rapide et 3 heures pour les mortiers).

Les briquettes seront conservées pendant ces 24 heures sur leur plaque dans une atmosphère saturée d'humidité à l'abri des courants d'air et des rayons du soleil, autant que possible entre 15 et 18°C. On pèse les briquettes après démoulage si on veut s'assurer de la régularité de leur confection.

Les briquettes sont ensuite exposées dans le milieu choisi pour leur conservation : eau douce, eau de mer ou air.

Dans l'eau douce la pronfondeur de l'eau dans le bac ne devra pas dépasser 1 m. et cette eau sera renouvelée toutes les semaines.

Si l'immersion est faite dans l'eau de mer, on renouvellera l'eau tous les deux jours pendant la première semaine et ensuite toutes les semaines. Pendant la première semaine le volume occupé par l'eau dans le bac devra être égal à quatre fois au moins celui des briquettes.

Si les briquettes sont conservées à l'air, l'état hygrométrique devra être tenu aussi voisin que possible de la saturation et elles seront placées à l'abri des courants d'air et des rayons du soleil. La température sera maintenue entre 15 et 18°.

Les essais normaux de rupture par traction porteront sur la pâte normale de ciment et sur le mortier normal sec, conservés dans l'eau douce.

On se conformera, pour ces essais, aux dispositions générales ci-dessus et aux dispositions spéciales ci-après en ce qui concerne la confection des briquettes.

Au moment du mélange le ciment, le sable, l'eau et l'air seront à des températures comprises entre 15 et 18°.

Le mortier normal sec sera damé dans le moule avec une spatule en fer longue de 0 m. 35 environ, manche compris, présentant une surface de battage de 25 cm² et pesant 50 gr. On procédera d'abord par petits coups répétés au pourtour et on les étendra ensuite au centre ; ensuite on frappera plus énergiquement et on continuera le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre plus d'élasticité et que l'eau sue à la surface. On procédera ensuite au désassement et au lissage.

Le nouveau cahier des charges du ministère des Travaux publics prescrit simplement de gâcher la pâte pendant 5 minutes puis de placer celle-ci dans une boîte de 0 mm. 4 de profondeur. La pâte est considérée comme ayant une bonne consistance quand elle est traversée jusqu'à 6 mm. par une sonde de consistance de 1 cm. de diamètre et du poids de 300 gr.

Le mortier sec a été abandonné et remplacé par le mortier plastique. Pour la confection de ce mortier on emploie du sable normal composé de trois sortes de grains par parties égales. Ils sont obtenus à l'aide de tamis à trous de 0 mm. 5, 1 mm., 1 mm.5. Le mortier est gâché avec une quantité d'eau qui est pour 1 kg. de matière de 60 gr. + $\frac{P}{6}$, P. désignant la quantité d'eau nécessaire pour transformer 1 kg. de ciment ou de chaux en pâte ferme.

*
* *

A la *Kônigliche Mechanisch-technische Prüfungssanstalt de Charlottenbourg* (1), voici comment on opère la préparation des

(1) *Tonind. Ztg.*, 1896, n° 45.

éprouvettes. On place sur une plaque de verre ou de métal cinq feuilles de papier gris humecté d'eau et l'on pose dessus cinq moules humides. On pèse 250 gr. de ciment avec 750 gr. de sable normal et on les mélange bien l'un avec l'autre dans une terrine. Ensuite on ajoute 100 gr. d'eau douce et travaille le tout pendant 5 minutes.

Le mieux est de faire reposer les formes sur une plaque de fonte mesurant environ 30 × 20 × 6 cm. ou une plaque de verre identique reposant sur une plaque de marbre fixée dans une table solide et sur laquelle on place alors les moules sans interposition de papier.

En général avec 10 % d'eau on a un excès de liquide. On remplit alors les moules de manière à en introduire un excès. On rase l'excès de ciment et lisse la surface. Ensuite on détache le moule et on place le corps dans une caisse de zinc fermée par un couvercle pour éviter la dessiccation irrégulière à des températures variables.

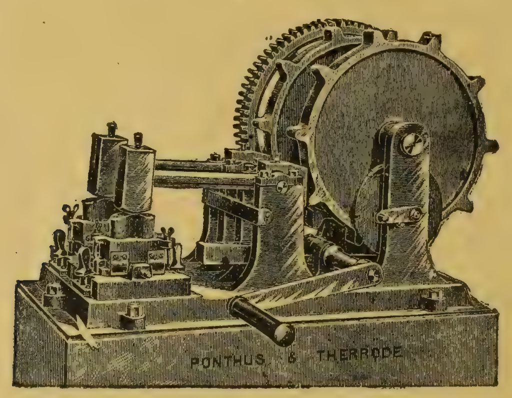


Fig. 176. — Machine à marteaux de Böhme pour battre les éprouvettes

Vingt-quatre heures après l'achèvement des éprouvettes, on les place sous l'eau en ayant soin qu'elles en restent bien couvertes pendant toute la durée de leur immersion.

En Allemagne et en Suisse on se sert beaucoup des machines de Tetmayer et de Böhme pour le battage des briquettes de mortier. On frappe un nombre de coups déterminés (150 en 2,5 à 3 minutes avec la machine de Böhme) pour donner de la régularité.

L'appareil de Böhme est représenté par la figure 176. Il se com-

pose esssentiellement d'un système de roues dentées munies d'un nombre fixe de saillies équidistantes ; il est mû à l'aide d'une manivelle. La rotation vient faire buter ces saillies contre l'extrémité du manche articulé d'un marteau ayant toujours le même poids et le même bras de levier. Il s'ensuit que le marteau se trouve relevé à la même hauteur à des intervalles égaux, puis, la roue continuant à tourner, il retombe et vient frapper sur le moule. Ces machines sont construites à un ou deux ou trois marteaux.

Les machines qui servent à effectuer les essais de résistance à la traction comportent divers dispositifs.

La machine de Michaëlis est formée d'une sorte de balance dont le fléau porte à l'extrémité de son grand bras un étrier supportant un seau Z dans lequel tombe de la grenaille de plomb venant d'un récipient placé à sa droite. L'extrémité gauche du fléau se

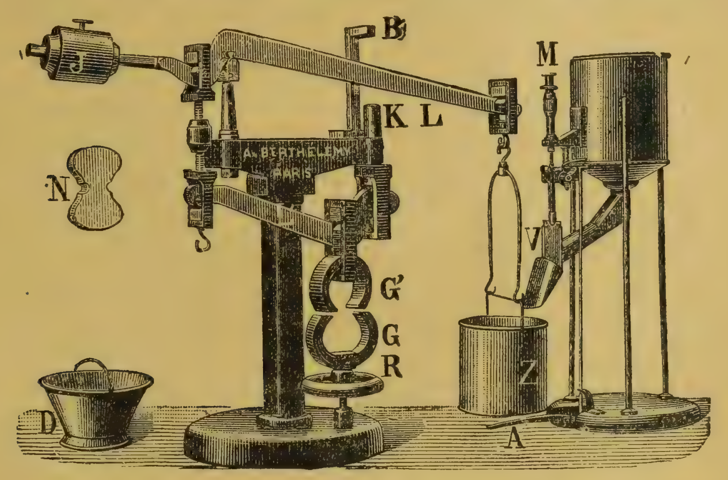


Fig. 177. — Machine de Michaelis pour les essais de résistance à la traction

termine par un poids. Un peu à gauche du point de suspension et un peu au-dessous vient s'appuyer un étrier qui commande l'extrémité libre du levier agissant sur une mâchoire qui sert à prendre la partie supérieure de l'éprouvette. La partie inférieure est saisie par une mâchoire située au-dessous de la première. Le levier supérieur multiplie 10 fois et le levier inférieur 5 fois. Comme la section de l'éprouvette est de 5 cm², il suffit de multiplier par 10 le poids trouvé en X pour avoir la résistance pour 1 cm².

Pour opérer on met la balance en équilibre au moyen du contre-poids Y de manière à ce que l'arête supérieure du grand levier vienne affleurer un repère; ceci étant réalisé, on place un cavalier assez lourd pour amener la grande branche à s'abaisser et, en tournant le volant fixé sur le pied de l'appareil, on amène les deux griffes en contact. On place alors la briquette dans la griffe; on fait tourner le volant jusqu'à ce que le levier affleure de nouveau la ligne de repère et la dépasse de 4 ou 5 mm. pour compenser la flexion qui peut se produire dans les différentes parties de l'instrument. Après avoir décroché le seau Z, on enlève le cavalier et ouvre la vanne du récipient à grenaille de plomb. Au moment de la rupture, le seau tombe sur la pédale A, ce qui arrête le débit du plomb. Le vase D figuré à gauche sert pour les briquettes de faible résistance.

RÉSISTANCE A LA COMPRESSION

Pour ce genre de déterminations on emploie des éprouvettes qui ont la forme de cubes présentant en moyenne 50 cm² de surface. On les prépare comme les éprouvettes servant aux essais de résistance à la rupture. On se sert d'un moule cubique que l'on remplit de ciment préparé et l'on dame le tout avec un pilon en bronze de poids déterminé (fig. 179). Il est important de ne pas remplir le moule d'un seul coup, afin d'avoir une compression uniforme. On le remplit en deux ou trois fois. Quand une couche est pilonnée, on gratte la surface du mortier pour favoriser la liaison avec la couche suivante. Le pilonnage de ces éprouvettes peut également se faire à l'aide de la machine à marteaux de Böhme.

L'essai se fait aussi sur les $\frac{1}{2}$ briquettes ayant servi aux essais de traction, on opère sur chacune et l'on additionne les résultats de deux briquettes jumelles. La surface d'une demi-briquette est de 15 cm² 7. On peut aussi remplacer les $\frac{1}{2}$ briquettes par des éprouvettes obtenues dans des moules cylindriques de 45mm. de hauteur dont la surface est à peu de chose près la même.

La compression de l'éprouvette est obtenue à l'aide de divers appareils. Un des plus employés est la presse hydraulique représentée par la figure 178. Elle se compose d'un cylindre principal rempli d'huile de ricin, d'un cylindre inférieur rempli de mercure recouvert d'une couche d'huile pour assurer l'étanchéité, et

d'un manomètre à mercure relié à la partie inférieure de ce cylindre.

La briquette étant placée sous la presse comme il est indiqué, on opère sur celle-ci une première pression à l'aide du volant actionnant la vis, puis on tourne la manivelle dans le sens de la flèche, ce qui a pour résultat de faire pénétrer dans le cylindre un piston de faible diamètre; le piston s'élève et opère contre la briquette la pression qui doit la faire rompre. Pendant cette opération les pistons inférieurs de la presse ont également agi sur le mercure contenu dans le cylindre, et l'ont fait monter dans le manomètre; un flotteur reste en place quand la colonne de mercure recule, indiquant ainsi d'une façon permanente l'effort qu'il a fallu pour rompre la briquette. Le manomètre indique la pression par cm² et la charge totale.

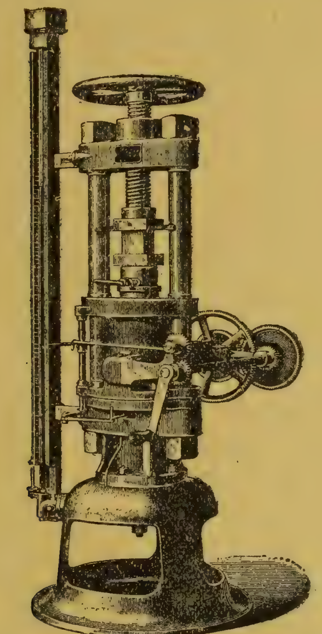



Fig. 178. — Presse hydraulique.

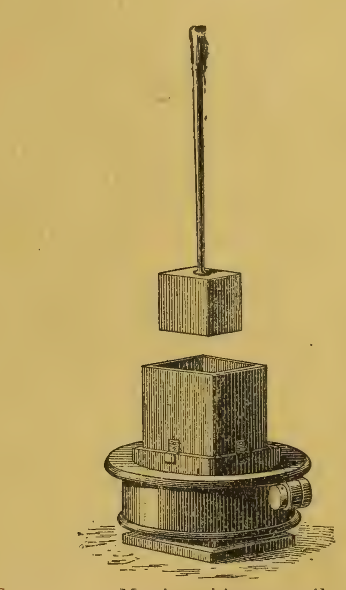


Fig. 179. — Moule cubique et pilon

Quand la machine n'a pu rompre la briquette, on ouvre un robinet qui permet l'évacuation de l'huile de ricin du cylindre.

Lorsque la briquette est rompue, il suffit de tourner la manivelle dans le sens inverse jusqu'à ce que le mercure du manomètre soit descendu au zéro de l'échelle.

On ramène alors le flotteur en contact avec le mercure à l'aide d'un cordon disposé à cet effet.

La machine est alors prête pour une deuxième opération.

Le Dr Framm donne les chiffres suivants pour les résistances fournies par les ciments analysés :

Résistance à la traction

Limites (kilog. par cm²)	Nombre d'échantillons examinés 1902	1903	1904	1905	1906	1907	Totaux
Jusqu'à 16	6	5	7	1	1	—	20
16-18	3	3	14	16	1	3	40
18-20	11	10	11	13	3	7	55
20-22	11	26	23	9	10	18	97
22-24	22	27	19	26	14	21	129
24-26	11	12	11	10	14	12	70
26-28	13	5	6	6	18	12	60
28-30	3	2	1	—	12	6	24
30-32	—	1	—	1	5	1	8
32-31	—	–	—	—	3	3	6
Nombre d'échantillons examinés							509

Résistance à la compression

Limites (kilog. par cm²)	1902	1903	1904	1905	1906	1907	Totaux
Jusqu'à 160	3	3	9	1	1	2	19
160-200	10	13	17	18	16	25	99
200 240	29	29	20	25	19	26	148
240-280	21	22	23	19	21	17	123
280-320	12	16	13	11	13	8	73
320-360	4	5	5	5	8	3	30
360-400	1	1	4	2	—	—	8
400-440	—	2	1	—	2	—	5
440-480	—	—	—	1	1	—	2
Nombre d'échantillons examinés							509

Ces tableaux montrent que pour les échantillons examinés la *résistance à la traction* est en moyenne de 22,66 kg. par cm², et la *résistance à la compression* de 242,3 kg. par cm².

POROSITÉ

La porosité est le rapport du volume des vides que présente la pâte ou le mortier au volume apparent total. Le vide comprend

le volume occupé par l'eau d'imbibition et par l'eau hygrométrique, à l'exclusion de l'eau de combinaison qui fait évidemment partie du plein.

V étant le volume apparent total, v le volume plein, la porosité est représentée par l'expression :

$$\frac{V - v}{V}$$

On prend des éprouvettes ayant un volume qui variera de 300 à 500 cm^3.

Le volume plein v se détermine en prenant la différence de poids P de l'éprouvette pesée dans l'air et du poids p de l'éprouvette pesée dans l'eau.

Pour bien l'imbiber on maintient l'éprouvette dans l'air raréfié et au bout de 15 minutes on fait arriver de l'eau, de manière à l'immerger progressivement. On l'abandonne pendant 24 heures avant de faire la pesée. Si l'on n'a pas de moyen commode pour raréfier l'air on a recours à l'ébullition dans l'eau.

La dessiccation s'obtient en chauffant l'éprouvette dans une étuve. L'essai normal se fait sur du mortier normal plastique datant de 28 jours.

PERMÉABILITÉ

On mesure la perméabilité en déterminant le nombre de litres d'eau écoulés à l'heure à travers un bloc cubique de 50 cm^2 de surface.

L'eau destinée à la filtration à travers le bloc est amenée par un tube de verre de 0 m. 35 de diamètre et 0 m. 11 de hauteur, scellé verticalement au ciment pur. Le tube, fermé à sa partie supérieure par un bouchon de caoutchouc, sera mis en communication avec un réservoir élevé au niveau correspondant à la charge. Cette charge sera de 0 m. 10, 1 m. ou 10 m. suivant la perméabilité des mortiers. Avant de mettre le bloc en expérience on a soin de l'imbiber d'eau complètement dans un bac pendant 48 heures avec les précautions nécessaires pour arriver à une imbibition complète.

On constate ensuite le volume écoulé après 24 heures, 7 jours, 28 jours, trois mois.

L'essai normal se fait sur le mortier plastique âgé de 28 jours et conservé dans l'eau.

ADHÉRENCE

On détermine l'adhérence sur des éprouvettes dont la figure ci-jointe donne la forme, et qui sont moulées. Le moule est représenté figure 181. Un petit bloc de bronze de même dimension *a b* vient fermer le moule. On fait un mortier de 1 partie de ciment

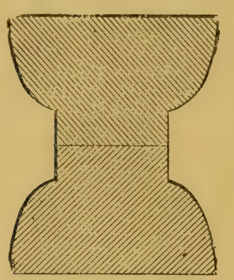


Fig. 180. — Eprouvette pour la mesure de l'adhérence

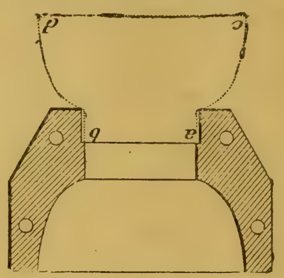


Fig. 181. — Moule pour les éprouvettes

passé au tamis de 900 mailles et 2 parties de sable normal passé aux tamis de 144 et 324 mailles. On obtient de cette sorte un mortier ayant après prise un grain serré, uniforme et qui peut se dresser facilement. Avec le sable normal ordinaire il se produit presque toujours des trous.

Après démoulage on abandonne les pièces moulées à l'air pendant 24 heures, puis on les immerge dans l'eau douce jusqu'au moment de l'essai et pendant au moins 28 jours. Quand on veut faire une expérience on laisse sécher et dépolit la surface devant recevoir le mortier d'essai avec du papier émeri n° 3.

On a ainsi le *bloc d'adhérence*. Ce bloc est retourné et garni du moule, puis on remplit le moule de mortier d'essai formé de 1 partie de ciment ou de chaux et de 2 parties de sable normal, à moins que l'on ne désire expérimenter d'autres dosages. On gâche le mortier à consistance plastique avec la quantité d'eau strictement nécessaire. Le mortier doit s'introduire librement sans opérer le battage à la spatule : un léger tassement doit suffire.

Le démoulage se fait après la prise et l'on conserve l'éprouvette à l'air pendant 24 heures, puis on la maintient immergée jusqu'au durcissement.

INVARIABILITÉ DE VOLUME

Une condition essentielle que doit remplir le ciment est de ne pas varier de volume, ce qui veut dire qu'il doit conserver défini-

tivement la forme que lui a donnée la prise et le durcissement subséquent, et que les variations spontanées de sa forme ne doivent pas dépasser les limites déterminées par la dilatation et la contraction résultant des variations naturelles de la température. Un ciment qui varie de volume est absolument inutilisable; il est d'un emploi dangereux.

Les causes de la contraction anormale du ciment sont :

1° La composition défectueuse du mélange brut et surtout une teneur prop forte en calcaire ;

2° La préparation défectueuse des matières formant le mélange (mauvais broyage et mélange imparfait).

3° Une cuisson incomplète.

4° Une teneur trop élevée en gypse ou en magnésie.

La contraction par suite d'une teneur trop forte en magnésie est la plus dangereuse parce qu'elle se manifeste, non au bout de quelques jours ou de quelques semaines comme dans les autres cas, mais seulement au bout d'un temps très long, parfois au bout de quelques années.

Pour constater la stabilité du volume du ciment gâché, on peut maintenir une galette de ciment pur immergée dans l'eau pendant 28 jours, alors qu'on laisse pendant le même temps une autre galette identique sécher à l'air.

Voici une série d'expériences que l'on exécute également :

1° On plonge une galette dans l'eau froide et on élève la température de l'eau de manière qu'au bout d'une heure elle soit en ébullition. Après 4 à 6 heures on retire la galette et l'examine;

2° La galette est placée dans une étuve 24 heures après le gâchage du ciment; on fait monter la température jusqu'à 120° et on laisse la galette à l'étuve pendant 3 heures;

3° Le ciment est pétri avec de l'eau de manière à former une boule de 8 à 4 cm. de diamètre et aussitôt on place celle-ci au-dessus de la flamme d'un bec de Bunsen; la flamme, d'abord faible, est augmentée progressivement de manière qu'au bout d'une heure environ la partie de la boule en contact avec elle soit portée au rouge. Quelquefois on attend que le ciment ait fait prise pour le placer sur la flamme du bec Bunsen;

4° On implante vers le commencement de la prise, dans une briquette de ciment de forme quelconque, deux épingles ordinaires à une distance déterminée. Aussitôt la prise faite, on mesure

exactement la distance de ces deux épingles et on la mesure une seconde fois après avoir laissé les briquettes quelques heures dans l'eau bouillante;

5° On agglomère, par un pilonnage énergique à l'aide d'une presse, de la poudre de ciment humectée avec très peu d'eau; on obtient ainsi des éprouvettes que l'on peut placer aussitôt dans une étuve. Les gonflements sont alors assez importants pour être mesurés directement.

Pour reconnaître les déformations déterminées par la présence d'expansifs, la Commission des essais a recommandé l'emploi des moyens suivants :

1° On étale sur une plaque de verre le mortier en forme de galette de 0 m. 10 de diamètre et de 0 m. 02 d'épaisseur en amincissant les bords.

Immédiatement après leur confection, les galettes destinées aux essais dans l'eau seront immergées dans les mêmes conditions que les éprouvettes devant servir aux essais de rupture.

On notera l'état des galettes au bout de 7 jours, 28 jours, 3 mois, 6 mois, 1 an, etc.

Au lieu de disques, on peut aussi employer des baguettes de 0 m. 80 de longueur à section carrée de 0 m. 12, que l'on placera dans un tube de verre rempli d'eau de 0 m. 025.

L'allongement sera accusé par le déploiement d'une aiguille sur un cadran comme dans le pyromètre à cadran.

2° A chaud on emploiera des éprouvettes cylindriques de 0 m. 30 de hauteur, confectionnées dans des moules en métal d'une épaisseur de 0 mm. 5. Ils seront fendus suivant une génératrice, et porteront soudées, des deux côtés de la fente, deux aiguilles de 0 m. 150 de longueur. La variation de l'écartement des deux aiguilles donnera la mesure du gonflement.

Les moules, aussitôt remplis, seront immergés dans l'eau froide. Une fois la prise terminée et dans un délai n'excédant pas vingt-quatre heures au delà de cette prise, la température de l'eau sera élevée à 100° en 15 à 20 minutes. On maintient 6 heures la température de 100°.

Cette méthode ne peut être appliquée aux ciments à prise rapide.

Le procédé dont on se sert en Allemagne pour déterminer la constance de forme du ciment est très simple. On prépare des galettes analogues à celles confectionnées pour la détermination du temps de prise, on les place pendant 24 heures dans une armoire en zinc où règne une humidité constante, ensuite on les place dans l'eau et les y laisse pendant 28 jours. Si au bout de cet espace de temps elles n'ont pas changé de forme, si elles restent planes (à la face inférieure), le ciment conserve bien son volume initial ; si, au contraire, elles montrent des crevasses à direction radiale, qui s'élargissent vers les bords, le ciment s'est contracté. Une contraction faible ne produit qu'un réseau de fentes et de crevasses très faibles, qu'il ne faut pas confondre avec le fendillement naturel résultant de la prise et du séchage trop rapide des mortiers dans les premiers temps de la prise. En outre, on reconnaît le fendillement normal lorsque les petites fentes forment des courbes irrégulières, présentant des retours sur elles-mêmes, tandis que les crevasses résultant de la contraction du ciment défectueux (qui exceptionnellement n'apparaissent qu'après la prise) ont une direction radiale, s'élargissent vers le bord de la galette et se rétrécissenit vers le centre.

Il est incontestable que les galettes soumises à l'essai mettent un temps très long pour révéler les défauts du ciment. Aussi, on a imaginé des procédés rapides pour déterminer en quelques heures l'invariabilité de volume des ciments ; malheureusement, ces méthodes fournissent des résultats qui ne sauraient inspirer confiance sans plus, car elle dépassent souvent le but en jetant le discrédit sur des ciments de qualité normale qui n'ont d'autre défaut que celui de ne pouvoir supporter le traitement brutal propre à la plupart de ces méthodes. Les procédés rapides n'en présentent pas moins de valeur dans certains cas (notamment dans l'examen des ciments magnésiens), et valent la peine d'être décrits rapidement.

a) *L'épreuve du séchage à 100° C.* — 100 gr. de ciment sont gâchés avec de l'eau (en quantité prescrite par les normes) et réduits en une galette sur un morceau de papier buvard placé sur une plaque de verre ou de métal. Après la prise, on enlève le papier buvard et l'on conserve la galette pendant 24 heures dans un endroit humide, puis on la dessèche à 100° sur une plaque métal-

lique (sur un bain d'air chauffé par l'eau bouillante), jusqu'à ce qu'elle ne dégage plus de vapeur d'eau (environ 3 heures).

b) *L'épreuve de la boule de Hintzel.* — 300 gr. de ciment sont humectés avec 60 cm³ d'eau, triturés rapidement de part en part, placés dans le creux de la main et transformés en une boule. On reconnaît qu'on a employé la quantité d'eau voulue lorsque le ciment paraît un peu gras au frottement et que la paroi de la boule cède sous la pression du doigt. Pour les ciments à temps de prise moyen et pour ceux qui, pour être transformés en galette exigent plus de 30 % d'eau, on sera obligé d'employer 61, 62 ou 63 cm³ d'eau pour la confection de la boule.

On place celle-ci sur une plaque de gypse. Au bout d'environ 5 minutes elle sera assez dure pour ne plus prendre l'empreinte de l'ongle si l'on frappe dessus du bout du doigt. On la place alors sur une mince plaque de tôle qu'on chauffe au-dessus d'un brûleur Bunsen. Au début, la pointe de la flamme ne doit pas toucher la plaque. Si l'on chauffait trop rapidement, la vapeur d'eau en se dégageant de la boule en ferait sauter de petites écailles du côté exposé à la chaleur. Dès que la boule commence à sécher au point de contact avec la plaque, on augmente peu à peu la flamme, jusqu'à ce que finalement elle recouvre toute la surface de la plaque (au bout d'une $\frac{1}{2}$ heure environ). Au bout de 2 heures de ce traitement, on ne remarque généralement plus de dégagement de vapeur en tenant une plaque de verre au-dessous de la boule ; l'opération est alors terminée. On aura soin de ne pas pousser le chauffage au point de faire rougir la plaque de tôle.

c) *L'épreuve de l'ébullition de Michaelis.* — 50 gr. de ciment sont gâchés avec 13 à 15 gr. d'eau, malaxés pendant une minute et transformés sur une plaque de verre en une galette de 1 cm. d'épaisseur, s'amincissant vers les bords, qu'on met à durcir pendant 24 heures dans un local saturé de vapeur d'eau ; cette galette est ensuite placée, avec ou sans la plaque de verre, dans un bain d'eau froide qu'on porte lentement à l'ébullition, c'est-à-dire en dix minutes environ, en recouvrant le vase d'un couvercle afin de réduire au minimum l'évaporation de l'eau. La galette doit être plongée entièrement dans l'eau. Lorsqu'il est nécessaire d'ajouter de l'eau, on la versera par petites portions à la fois pour ne pas causer d'interruptions trop prolongées dans l'ébul-

lition. Au bout de 3 heures d'ébullition, on retire la galette de l'eau et on l'examine.

d) *L'épreuve de l'ébullition du ciment à l'état de boule de Tetmajer.* — On gâche le ciment avec de l'eau et on le transforme en une boule d'environ 5 cm. de diamètre. La consistance de la boule doit être telle que l'on puisse l'aplatir en une galette sans l'émietter en frappant et appuyant dessus avec la main. On conserve la boule pendant 24 heures dans un endroit humide, puis on la place dans un bain d'eau froide qu'on porte à l'ébullition lentement, soit dans l'espace de 1 h. 1/4. Au bout de 6 heures d'ébullition, l'épreuve est terminée.

e) *L'épreuve à l'eau chaude de Maclay.* — On prépare avec de l'eau six galettes de ciment, ayant une épaisseur d'environ $\frac{1}{2}$ pouce et un diamètre de trois pouces ; ces galettes, placées sur des plaques de verre, doivent avoir la même consistance que celles employées pour déterminer la résistance à la traction (d'après le système américain). Une de ces galettes, aussitôt formée, est placée dans un bain de vapeur à 90-95° C. La deuxième est placée dans le même bain dès que la prise est terminée et qui résiste à une aiguille normale chargée du poids d'une livre ; la troisième est également placée dans le bain de vapeur après écoulement du double temps de prise. La quatrième galette est mise dans le bain de vapeur au bout de 24 heures ; la cinquième, sitôt sa prise achevée, est placée dans l'eau à une température de 15° C.; et enfin, la sixième est placée à l'air humide à 15° C. Les quatre premières galettes restent chacune dans le bain de vapeur pendant 3 heures ; ensuite elles sont placées pendant 21 heures dans l'eau bouillante. On examine ensuite chaque galette à la fin du traitement.

f) *L'épreuve de la pression de Prüssing.* — 100 gr. de ciment Portland sont gâchés avec 3 à 8 % d'eau, suivant la finesse de la mouture (1), puis étalés uniformément sur le moule à galettes, et soumis à une pression de 50 kg. par cm². Deux des galettes ainsi obtenues sont immédiatement extraites des moules, placées sur plaques de verre ou de tôle et abandonnées à elles-mêmes

(1) Pour obtenir un mélange intime du ciment avec cette faible quantité d'eau, on l'étend sur une feuille de papier, on y ajoute l'eau, on triture énergiquement le mélange à la main, puis on le fait passer à travers un tamis à 120 mailles par cm².

pendant 24 heures dans une armoire pour empêcher l'évaporation. Ensuite, elles sont placées dans l'eau froide ; l'une d'elles y est laissée pendant 28 jours, tandis que l'autre en est retirée au bout de deux heures et, si elle est intacte, elle est placée dans un bain d'eau à une température de 90 à 100° C. Si, après un séjour de 4 heures dans ce bain chaud, la galette est exempte de déformation et de crevasses, on peut présumer que le ciment résistera également au changement de volume dans ses applications les plus difficiles. Enfin, si après un séjour de 2 heures dans le bain chaud, la galette accuse une certaine résistance, c'est un signe que le ciment conservera cette qualité dans ses applications.

g) *L'épreuve de Faja.* — Parmi les méthodes rapides de détermination de l'invariabilité de volume, celle de Henry Faja, ingénieur anglais est incontestablement une des moins brutales. Elle consiste à exposer une galette de ciment fraîchement préparée sur une plaque de verre à l'action de la chaleur humide, à 38-41° C., pendant 6-7 heures, c'est-à-dire jusqu'à l'achèvement de la prise et ensuite à la placer pendant 24 heures dans un bain d'eau à 46-49° C. Ce traitement a pour effet de faire vieillir en quelque sorte artificiellement le ciment et de faire ressortir rapidement ses défauts s'il en a. Faja emploie à cet effet un vase muni d'un couvercle mobile dans lequel de l'eau, chauffée au gaz, est maintenue à une température de 46-49° C. Le vase est rempli d'eau jusqu'à une certaine hauteur, et au-dessus de son niveau est placée une grille. Lorsque l'eau a atteint la température de 36-39°, l'espace supérieur du vase sera rempli de vapeur à 38-41° C. On place donc la galette sur la grille du vase et on l'y laisse pendant 6-7 heures, puis on la place dans l'eau chaude où elle reste également pendant 17-18 heures.

Faja a démontré que si la galette n'accuse pas de signes de contraction après le traitement que nous venons d'indiquer et reste solidement attachée à la plaque de verre, le ciment est de nature à inspirer confiance, car il ne se contractera pas.

La méthode de Faja paraît mieux appropriée à la nature du ciment que la plupart des épreuves à chaud, dont quelques-unes, appliquées à des ciments de très bonne qualité, ont donné lieu à des erreurs préjudiciables.

« Il est hors de doute, dit Meade, que d'excellents travaux en béton ont été exécutés avec des ciments qualifiés mauvais, et c'est

ce qui explique le discrédit dont sont entourées toutes les méthodes d'essai à chaud. Il est vraisemblable qu'un grand nombre des premiers ciments américains n'auraient pu résister à l'épreuve par la vapeur et, malgré cela, les applications dont ils ont été l'objet ont donné des résultats tels que les ingénieurs américains ne veulent plus employer que des ciments indigènes. Butler affirme que la méthode de Faja est excellente, et que pendant 20 ans qu'on l'a employée, il ne s'est pas présenté un seul cas où un ciment examiné d'après cette méthode ait donné de mauvais résultats à l'application.

Mais, si la méthode Faja est assez énergique pour faire rejeter tous les mauvais ciments, les épreuves par la chaleur sont inutilement brutales, et font rejeter comme mauvais un grand nombre de ciments qui supportent très bien l'épreuve de Faja.

Le tableau de la page suivante, que nous extrayons du rapport du Dr Framm (1), résume les propriétés générales des ciments analysés (509 analyses exécutées de 1902 à 1907).

AUTRES PROPRIÉTÉS DU CIMENT PORTLAND ET CONCLUSION

Une des propriétés les plus précieuses du mortier de ciment Portland est sa résistance aux variations extrêmes de la température, tandis que le ciment pur, en raison des crevasses capillaires qui s'y produisent inévitablement, ne possède pas cette propriété. Mais, ce fait n'a aucune importance pratique, vu que le ciment n'est jamais employé à l'état pur dans les constructions, mais associé à une proportion plus ou moins grande de sable.

Le mortier de ciment peut être employé à la construction même dans les pays où la température est très élevée, par conséquent sous les tropiques, pourvu qu'on ait soin de faire en sorte que l'eau ne lui soit enlevée trop rapidement. Le mortier se durcit même plus vite dans l'eau chaude que dans l'eau froide, et l'eau même bouillante ne lui est pas nuisible ; au delà de cette limite, sa résistance est moins grande, mais elle reste constante. Le bon mortier de ciment peut supporter sans inconvénient des températures de 200 à 300° C. Les carneaux des foyers et les cheminées en béton de ciment nous en fournissent de nombreux exemples.

Le mortier de ciment résiste également bien au froid et à la

(1) *Loc. cit.*

Propriétés générales des ciments

Valeurs maxima, minima et moyennes 1902-1907

Désignation	1902			1903			1904			1905			1906			1907		
	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne
Perte au feu 0/0	5,29	0,45	2,51	6,78	0,95	2,52	6,76	0,89	2,61	7,86	0,36	2,60	5,26	0,64	2,55	7,32	0,94	2,87
Poids spécifique du ciment livré	3,125	2,958	3,042	—	—	—	3,117	2,927	3,048	3,125	2,857	3,036	3,156	2,910	3,022	3,161	2,857	3,049
» » calciné	3,225	3,079	3,142	3,213	3,049	3,146	3,214	3,034	3,156	3,225	3,113	3,167	3,259	3,049	3,177	3,247	3 094	3,184
Poids du litre à la livraison, kg.	—	—	—	—	—	—	1,238	0,935	1,106	1,358	0,980	1.138	1,344	0,990	1,135	1,320	0.833	1,117
» après calcination kg.	—	—	—	—	—	—	1.984	1,523	1,769	1 924	1,603	1,743	1,959	1,650	1,772	1,983	1.527	1,747
Résidu sur tamis à 900 mailles 0/0	5,2	0,02	1,49	5,2	0,2	1,43	4,4	0,2	1,36	9,4	0,2	1,95	7,3	0,3	1,76	10,8	0,1	1,62
» » 5000 » 0/0	34,2	12,2	22,95	35,2	11,0	22,7	33,3	12,3	22,4	33,3	12,3	21,8	31,8	9,0	19,9	41,0	7,3	20,1
Temps de prise	12 h. 15 m.	20 m.	6 h. 16 m.	16 h. 50 m.	13 m.	7 h. 36 m.	11 h. 40 m.	12 m.	8 h. 10 m.	11 h. 10 m.	12 m.	6 h 46 m.	12 h. 20 m.	15 m.	6 h. 37 m.	11 h. 10 m.	25 m.	7 h. 9 m.
Addition d'eau pour le gâchage Mortier 1 : 3	10,0	8,25	8,69	9,0	8,25	8,51	9,0	8,25	8,57	9,5	8,0	8,67	9,25	8,5	8,72	9,25	8,25	8,68
Résistance à la traction 1 : 3 Sable normal, kilog. par cm² après 28 jours	29,21	10,37	22,41	30,66	14,88	22,02	29,60	12,81	20,90	30,95	14,87	21,50	33,96	15,07	25,39	33,59	16,61	23,75
Résistance à la compression 1 : 3 Sable normal, kilog. par cm² après 28 jours	388 5	86,4	242 9	437,1	123,4	245	402,2	98,2	241,6	445,8	128,8	244,4	466	79,8	248,8	430,4	137,6	230,8
Rapport Résistance à la traction / Résistance à la compres.	1 / 16,3	1 / 7,0	1 / 10,8	1 / 17,1	1 / 8,0	1 / 11,1	1 / 18,7	1 / 7,7	1 / 11,4	1 / 17,7	1 / 8,2	1 / 11,3	1 / 16,9	1 / 5,3	1 / 9,7	1 / 16,1	1 / 6,9	1 / 9,7

gelée. Lorsque la prise est achevée, les plus grands froids restent sans influence sur lui. Il est clair que l'emploi du mortier de ciment aux époques de grand froid exige certaines précautions, dont la première est de n'employer pour le gâchage du mortier que la quantité d'eau strictement nécessaire à la prise du ciment ; car l'eau ajoutée en excès gèlerait et ferait éclater le ciment. En chauffant le sable et l'eau, et n'employant de celle-ci que la quantité strictement nécessaire, on est sûr d'obtenir une prise rapide.

Toutefois, les opérations de crépissage ne doivent jamais s'effectuer dans les moments de gelée, qui a pour effet de les détruire, ainsi que le montre l'expérience.

Si nous résumons ce que nous avons dit plus haut des propriétés du ciment Portland, nous pouvons affirmer sans hésitation que celui-ci constitue le liant hydraulique le plus parfait. Il est supérieur à tous les mortiers connus sous le rapport de :

1° Sa parfaite conservation en magasin ;

2° Son durcissement ;

3° Son rendement à l'application ;

4° Sa résistance à la pression, son adhérence et son imperméabilité ;

5° Sa résistance aux influences extérieures ;

6° Son invariabilité de volume et sa résistance aux agents atmosphériques ;

7° La possibilité de l'employer aussi bien aux constructions à l'air que sous l'eau.

Les applications sans cesse croissantes de ce liant sont une preuve que ses excellentes propriétés sont de plus en plus reconnues et appréciées. Il n'y a pas encore bien longtemps il n'était employé que dans certains cas exceptionnels, pour les fondations difficiles, les travaux sous l'eau, etc., tandis qu'actuellement, grâce aux progrès réalisés dans sa fabrication, il offre le moyen de bâtir beaucoup plus rapidement et plus solidement qu'il y a seulement 20 ans. Malgré cela, il y a encore beaucoup à faire sous ce rapport, surtout en France où d'importants travaux d'ordre économique restent à exécuter qui procureraient à l'industrie du ciment des débouchés considérables.

CHAPITRE XIV

ANALYSE CHIMIQUE DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES PRODUITS FABRIQUÉS [1]

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

Le chimiste d'une fabrique de ciment est appelé à analyser :

1° Les matières premières à leur arrivée à l'usine et en cours de fabrication.

2° Les produits fabriqués (contrôle chimique, physique et mécanique) ;

3° Les matières auxiliaires, telles que les huiles de graissage, le charbon, l'eau d'alimentation des chaudières, etc. Mais comme l'analyse de ces matières n'est pas spéciale à l'industrie du ciment, nous ne nous en occuperons pas.

La tâche la plus importante du chimiste est sans conteste l'analyse des matières premières, car toute erreur ou toute négligence commises dans ce travail entraînent de graves inconvénients : elles peuvent donner lieu à l'obtention d'un ciment défectueux ou nécessiter tout au moins des corrections et rectifications en cours de fabrication et entraver ainsi parfois la marche régulière des opérations.

Le contrôle en cours de fabrication présente également de l'importance ; mais, ce contrôle est considérablement facilité par la régularité et l'uniformité de composition des matières mises en œuvre. Tout le reste est donc subordonné à ce premier travail d'analyse des matières brutes, qui très souvent d'ailleurs, absor-

(1) Pour la rédaction de ce chapitre, nous avons puisé d'excellents renseignements dans la brochure du Dr F. V. Arlt, citée dans notre liste des ouvrages consultés.

be tout le temps dont le chimiste peut disposer, surtout lorsque les matières n'ont pas une composition constante.

Les analyses exécutées dans une fabrique de ciment doivent être soigneusement inscrites au livre d'analyses; tous les produits analysés doivent être conservés, tout au moins pendant un certain temps, dans des flacons bouchés.

Les principales matières premières employées pour la fabrication du ciment sont la chaux, la marne, l'argile et les pouzzolanes.

La chaux, qu'elle soit sous forme de craie ou de pierre calcaire, contient toujours des impuretés, telles que : silice (souvent sous forme de sable), alumine, oxyde de fer, sulfate, matières organiques) ; mais l'impureté qui doit surtout attirer l'attention est le carbonate de magnésie.

Pour la fabrication du ciment Portland, les roches calcaires sont séchées et broyées pour être ensuite mises en œuvre avec les silicates ; pour celle du ciment de pouzzolanes, elles sont préalablement soumises à la cuisson et ensuite hydratées.

Les pierres calcaires d'un même gisement ont souvent une composition chimique uniforme ; d'autres fois on trouve dans un seul et même gisement des couches dont la composition diffère complètement de celle des couches voisines.

Les marnes sont des mélanges très intimes de chaux et d'alumine (environ 10 % de la première et 80 % de la seconde). Comme matières étrangères on y trouve des veines de quartz, parfois du mica, des pyrites sulfureuses, des matières organiques ; elles peuvent également contenir de la magnésie. Les marnes doivent être analysées avec d'autant plus de soin que les différentes couches accusent souvent de grandes irrégularités, non seulement sous le rapport de leur teneur en carbonate de chaux et en argile, mais encore en carbonate de magnésie et en matières étrangères. Le tableau de la page suivante peut nous en donner une idée.

Suivant leur composition on distingue les marnes calcaires contenant peu d'argile, et les marnes argileuses contenant une forte proportion d'argile.

Les marnes calcaires sont employées pour la fabrication de chaux hydraulique et entrent comme élément calcaire dans celle du ciment Portland. Elles sont propres à la fabrication de chaux hydraulique lorsqu'elles contiennent environ 16 à 25 % de silice.

Les marnes des colonnes 1 et 3 du tableau ci-dessous rentrent dans cette catégorie.

Analyses de marnes

Noms des auteurs	Collet-Descotils	Knauss	Rivot	Berthier	Feichtinger	Knauss	Feichtinger	Ljamin
Origine	Dreux	Horb	Le Teil	Metz	Bavière	Essex	Perlmoos	Russie
SiO^2	17,0	11,2	13,75	11,6	29,19	21,9	15,92	13,48
Al^2O^3 ...	1,0	5 3	0,65	3,6	3,76	3,5	5,94	4,77
Fe^2O^3	—	2 2	traces	—	7,07	8,2	3,98	1,35
FeO	—	2,4	—	3,0				
MnO	—	—	—	1,5	—	—	—	—
$CaCO^3$ ...	80,0	63,1	83,93	76,5	55,87	57,8	70,64	79,38
CaO	—	—	—	—	0,70	—	—	—
$MgCO^3$ ..	1,5	12,3	—	3,0	0,60	5,7	1,02	0,24
Alcalis ..	non dosés	non dosés	non dosés	non dosés	0,85	1,1	1,37	non dosés
Eau, etc.	séchée	séchée	1,77	séchée	1,04	1,8	0,79	0,6

Les marnes argileuses contenant environ 1,6 — 2,3 parties de chaux pour un partie de silice + alumine + oxyde de fer, servent à la fabrication du ciment Portland naturel : il suffit alors de les calciner et de les broyer sans autre préparation préalable ; mais ce mode de fabrication tend à disparaître de plus en plus. Les marnes qui s'y prêtent le mieux sont celles des colones 7 et 8 du tableau ci-dessus.

Les marnes à teneur encore plus élevée en argile (30 à 40 et même 50 %) servent à la fabrication du ciment romain (colonnes 4, 5 et 6 du tableau ci-dessus).

Les *argiles* sont employées uniquement comme matières premières dans la fabrication du ciment Portland. Elles peuvent contenir comme matières étrangères du quartz, des pyrites sulfureuses, du plâtre, du carbonate de chaux et du carbonate de magnésie, comme le montre le tableau de la page suivante.

La composition des argiles est loin d'être constante dans les différentes couches d'une seul et même carrière.

Dans l'industrie céramique on distingue la substance argileuse proprement dite, c'est-à-dire le silicate d'alumine à l'état pur connu sous le nom de kaolin, et les autres éléments de l'argile. Pour l'industrie du ciment, cette distinction n'a pas de raison d'être; du

moins, on ne connaît pas actuellement de relations entre la constitution des argiles et la nature des ciments.

Analyses d'argiles (*)

Auteurs	Michaelis	Michaelis	Michaelis	Feichtinger	Faraday	Schoch	Schoch
SiO^2........	60,06	59,25	62,48	68,45	64,72(1)	76,90(2)	46,22(3)
Al^2O^3.......	17,79	23,12	20,00	11,64	24,27	10,58	30,62
Fe^2O^3.......	7,08	8,53	7,33	14,80	7,64	7,45	22,38
CaO........	9,92	—	6,30	0,75	18,9	2,05	0,31
MgO........	1,89	2,80	1,16	—	—	1,03	0,15
Alcalis.....	3,23	3,47	2,11	4,00	—	non dosés	non dosés
$CaSO^4$.....	0,60	2,73	0,60	—	—	SO^3 0,24	traces

(1) Dont 31,46 % de sable.
(2) Perte au feu 3,79 %.
(3) Perte au feu 19 %.

Les *pouzzolanes* ont été suffisamment décrites dans le corps de l'ouvrage ; nous n'y reviendrons pas.

L'*extraction des matières premières* se fait d'après toutes les méthodes connues. L'argile est extraite presque exclusivement par tranchées à ciel ouvert, de même que les pierres calcaires dures et la marne ; ces dernières exigent parfois l'emploi d'explosifs.

Bien que la surveillance de l'extraction des matières brutes ne rentre pas à proprement parler dans les attributions du chimiste de la fabrique, celui-ci n'en doit pas moins vérifier par des analyses préalables le degré d'uniformité de composition des gisements des matières (chaux, marne, argile) soumises à l'extraction; par suite, il doit être familiarisé avec les méthodes d'extraction, et connaître la composition approximative des matières brutes avant leur convoyage à l'usine. L'importance, qui s'attache à l'analyse préalable des matières ressort de ce que nous avons dit plus haut de la variation dans la composition des gisements de chaux, de marne et d'argile, qui entraîne souvent des modifications dans la méthode de préparation. En tout cas, le chimiste doit faire en sorte de s'éviter toute surprise en cours de fabrication, dans l'analyse des poudres brutes par exemple. Enfin, il doit s'arranger de

(*) A l'état calciné.

manière que les matières soient utilisées aussi complètement que possible et que les « rebuts » soient réduits au minimum.

PRISE D'ÉCHANTILLONS DES MATIÈRES PREMIÈRES

Avant d'exploiter un gisement de calcaire, de marne ou d'argile, il est nécessaire de se rendre compte de la composition de ces matières. A cet effet, le chimiste devra dresser un plan de la carrière et noter tout spécialement les points sur lesquels les matériaux sont facilement accessibles. Ensuite, il y aura lieu de prélever des échantillons aux différents niveaux et de les soumettre à l'analyse. Si celle-ci donne les résultats désirés, on détermine les points sur lesquels il y a lieu de faire des forages ou des tranchées, et on les note sur le plan. Ces précautions sont encore plus importantes lorsque la matière première forme des gisements considérables.

Pour prélever les échantillons destinés à l'analyse chimique et à l'essai de cuisson, on enlève de chaque couche de la matière une tranche verticale d'une épaisseur à peu près constante. Les morceaux séparés isolément de la couche ne représenteraient pas des échantillons moyens.

Dans les gisements d'argile, qui présentent le plus d'irrégularités de composition, il est nécessaire de faire de nombreux forages sur différents points et à différentes profondeurs pour obtenir des échantillons qui soient de nature à inspirer confiance.

Chaque échantillon d'argile ou de marne destiné à l'analyse et à l'essai de cuisson doit être d'au moins 50 kg. On divise finement la matière, on en prélève un grand nombre d'échantillons qu'on réunit et mélange à fond, puis on prélève sur ce mélange de nouveaux échantillons qu'on réunit et mélange de nouveau et ainsi de suite pour n'avoir plus finalement qu'un échantillon unique de 100 grammes. Lorsque l'échantillon est prélevé sur la matière livrée à l'usine en cours de fabrication et qu'elle contient des pierres ou des rognons qui doivent être éliminés à l'aide des machines, on élimine ces pierres par délayage et on soumet à l'analyse la matière fine qu'on aura ainsi séparée. Mais si la matière est soumise au broyage telle quelle, on fait sécher l'échantillon de 100 gr. et on le broie finement, puis on le soumet à l'analyse.

Lorsqu'il est nécessaire de doser l'humidité naturelle de la matière on fera ce dosage avant l'analyse, en opérant sur une série d'échantillons fraîchement prélevés dans la carrière.

Comme l'humidité naturelle des matières est bien variable, l'analyse devra porter sur les échantillons séchés à 120° jusqu'à poids constant, sinon il sera difficile d'obtenir des résultats comparables.

MÉTHODES D'ANALYSE POUR L'ÉTUDE DES MATIÈRES PREMIÈRES ET DES PRODUITS INTERMÉDIAIRES

Dosage de l'eau. — Le dosage de l'eau dans la boue obtenue par le délayage dans les fabriques qui travaillent par le procédé humide se fait d'une manière très simple : on place la matière dans des capsules de métal et on la fait évaporer au bain de sable ou à l'étuve. Le seul point important est de veiller à ce que l'évaporation se fasse à une température d'au moins 110°. On opère sur 10 gr. afin de faciliter le calcul, et on contrôle de temps en temps la diminution du poids. Pour activer le refroidissement de la capsule, le plus simple est de la placer sur une plaque de fer.

Lorsqu'il s'agit de déterminer la quantité de substance sèche contenue dans la boue du bassin de délayage, par exemple pour rectifier les proportions du mélange, on prélève un bon échantillon moyen de la boue, un litre exactement, on le pèse et on détermine la substance sèche sur un poids de 10 gr. La quantité de substance sèche contenue dans le bassin est alors facile à calculer si l'on connaît la capacité du bassin et son degré de remplissage.

Dosage de l'acide carbonique. — Dans la fabrication du ciment hydraulique par la cuisson d'un mélange de chaux et de silicates, il est nécessaire de soumettre ces matières à un contrôle incessant. Dans la fabrication de ciment romain ou des ciments Portland dits naturels, ce contrôle est nécessaire pour le triage des matières premières : on sépare celles qui sont riches en calcaire de celles pauvres en calcaire de manière à les mélanger ensuite en proportions voulues pour obtenir un produit de composition normale. Cette méthode est surtout usitée dans la fabrication du ciment romain, le ciment Portland se préparant uniquement avec des mélanges artificiels.

Le contrôle analytique est le même dans les deux cas. Il se borne, en principe, au dosage de l'acide carbonique. La majeure partie de cet acide est combinée à la chaux, et il est d'usage d'exprimer le résultat de ce dosage par une teneur déterminée en carbonate de chaux.

Une partie de l'acide carbonique peut être combinée à la magnésie ou au protoxyde de fer, mais la teneur en ces matières varie très peu dans les matières mises en œuvre dans une seule et même usine; d'ailleurs l'erreur résultant de leur présence ne tirerait pas à conséquence. On est donc fondé à se servir du dosage de l'acide carbonique pour contrôler la masse brute en marche courante de l'usine.

A cet effet, on se sert du titrage ou du dosage volumétrique à l'aide d'appareils spéciaux, qui sont les calcimètres.

Le titrage se fait de la manière habituelle avec de l'acide chlorhydrique normal et une lessive de soude normale. On aura soin, dans le dosage des carbonates, de ne pas les acidifier trop fortement, sinon l'expulsion de l'acide carbonique donnerait lieu à des erreurs. Comme indicateur on emploie le méthylorange ou la phtaléine de phénol. Le papier de tournesol, encore employé dans certaines fabriques, n'est pas recommandable pour le titrage des silicates. Le titrage avec la phénolphtaléine est un peu plus compliqué qu'avec le tournesol par suite de la nécessité de chasser l'acide carbonique par l'ébullition, mais cette complication n'est pas bien grande.

On fait le titrage en opérant chaque fois sur 1 gr. exactement pesé de la substance. Comme 1 gr. est neutralisé par 20 cm^3 d'acide chlorhydrique normal, il suffit de multiplier par 5 le nombre de cm^3 d'acide chlorhydrique normal employé pour trouver la teneur centésimale de la substance en $CaCO^3$.

Il y a lieu de faire remarquer expressément que le dosage calcimétrique ne doit être employé que pour l'essai préliminaire des matières dans les carrières et pour le contrôle en cours de fabrication des matières préalablement analysées. Il ne doit jamais être employé seul pour l'analyse de matières dont on ne connaît pas d'avance la composition.

Les *calcimètres* employés pour le dosage volumétrique de l'acide carbonique en cours de fabrication, se composent de deux tubes communiquants dont l'un est gradué en cinquièmes ou en dixièmes de centimètre cube (B fig. 182, 183 et 184), tandis que l'autre sert de compensateur (C), et d'un vase E dans lequel on place la matière à analyser, qu'on arrose d'acide chlorhydrique.

Pour éviter les calculs résultant des variations de la pression barométrique et de la température, on se sert d'une table four-

nie avec l'appareil pour déterminer le poids de substance à employer et pour obtenir par une simple lecture sur l'appareil la teneur centésimale de la matière en carbonate de chaux.

Pour exécuter l'essai on pèse exactement la quantité de substance indiquée par la table, on la place dans le flacon E en verre ou en caoutchouc durci, dans lequel on introduit à l'aide d'une pipette une quantité déterminée d'acide chlorhydrique (densité 1,124). On fixe ensuite le flacon dans l'appareil, on verse le liquide d'arrêt (mercure, pétrole, solution de borax à 1 % etc.,)

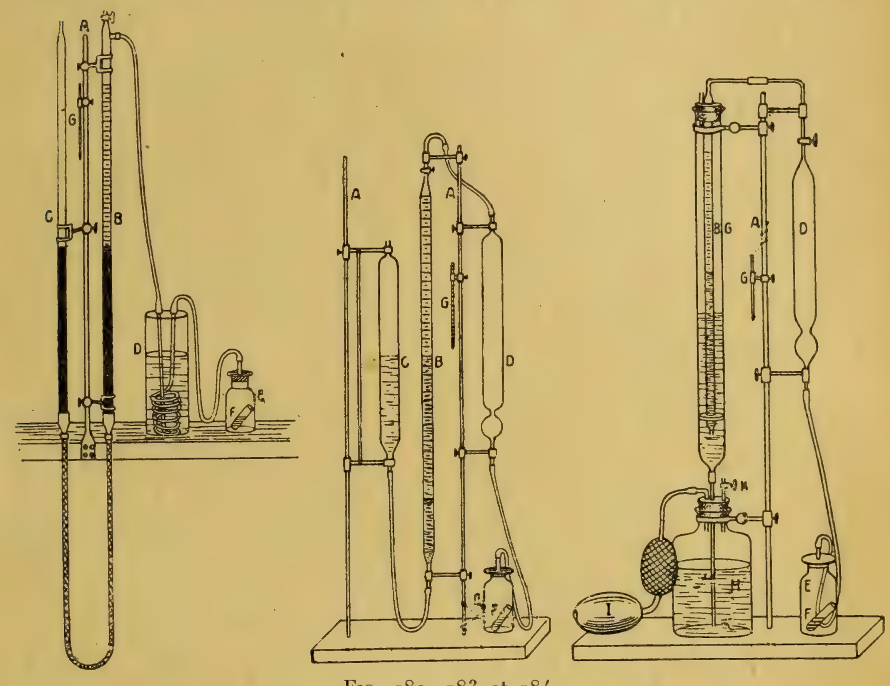


Fig. 182, 183 et 184

A. Support.
B. Tube mesureur.
C. Tube de compensation.
D. Refroidisseur.
E. Flacon de dégagement.
F. Flacon contenant la prise d'essai.
G. Thermomètre.
I. Poire de caoutchouc.
K. Robinet d'air.

dans les deux tubes de manière qu'il se fasse équilibre et on s'assure que l'appareil est bien fermé. Ensuite on incline lentement le flacon à dégagement de manière que l'acide chlorhydrique puisse arriver au contact de la substance, on secoue un peu le fla-

con pour activer la réaction et on abandonne l'appareil à lui-même pendant quelques minutes (toujours le même nombre).

Pendant le dégagement de CO^2 on cherche, en faisant baisser le liquide dans le tube compensateur, à diminuer un peu la pression en ayant soin de remarquer que cette diminution doit correspondre à peu près à la quantité correspondante qui a servi à dresser la table de correction dont il a été question ci-dessus. On rétablit ensuite l'égalité de niveau dans les deux tubes et on fait la lecture.

Il convient de faire remarquer que ces dosages sont très sensibles à l'action de la température. Il faut donc éviter tout échauffement de l'appareil, et surtout du flacon de dégagement, pendant l'essai. On ne touchera ce dernier qu'en le prenant par le col recouvert d'un linge.

Comme une partie de l'acide carbonique dégagé reste toujours en dissolution dans le liquide qui se forme alors, et comme cette partie ne peut être dosée chaque fois, on se sert également d'une table de correction. Cette table est fournie avec l'appareil.

Les formes les plus usuelles des calcimètres sont celles représentées par les figures 182, 183 et 184.

Appareil Dietrich. — Il se compose de deux tubes communiquants, reliés par un manchon de caoutchouc, et dont l'un (B) est gradué en 100 cm^3. Chaque centimètre cube est divisé en 5 parties. Le tube B porte à son extrémité supérieure un robinet et un tronçon sur lequel est monté un tube de caoutchouc qui le fait communiquer avec un tube de plomb immergé dans l'eau (D) et par celui-ci avec le couvercle du flacon de dégagement E. A l'aide des tables, on peut lire sur le tube les % de carbonate de chaux (fig. 182).

Appareil de Scheibler-Dietrich. — Un tube gradué B est relié par son extrémité inférieure, à l'aide d'un joint en caoutchouc, avec le tube compensateur amovible ; et à sa partie supérieure il communique, par un robinet à trois eaux, avec un tube refroidisseur de sûreté D également à l'aide d'un joint en caoutchouc. Ce dernier tube communique, à l'aide d'un joint en caoutchouc, avec le bouchon qui ferme le flacon de dégagement. La graduation du tube mesureur oblige à multiplier le chiffre lu par 2 pour obtenir les % de carbonate de chaux (fig. 183).

Appareil Baur-Cramer. — Le tube gradué est placé concentri-

quement dans le tube compensateur de manière que le liquide obturateur contenu dans un flacon puisse être pressé simultanément dans les deux tubes. La lecture faite sur le tube gradué donne directement les % de carbonate de chaux.

Appareil Schoch. — Le grand flacon de l'appareil Baur-Cramer est muni d'un robinet qui fait communiquer son intérieur avec l'air atmosphérique, ce qui permet de vider facilement les tubes B et C ou d'y faire baisser le niveau du liquide (fig. 184).

ANALYSE DE L'ARGILE

W. Michaelis a proposé une méthode rapide de dosage des éléments acides contenus dans le mélange brut.

A cet effet, on fait sécher environ 10 gr. du mélange brut (on en profite pour faire le dosage de l'eau) et on broie finement au mortier d'agate.

Ensuite on prend 2 gr. de la poudre fine ainsi obtenue et on les arrose lentement d'acide chlorhydrique dilué, additionné d'une goutte d'acide azotique, et on fait bouillir pendant 1/4 d'heure. On neutralise par l'ammoniaque, dont on ajoute quelques gouttes en excès, puis on chasse l'excès de réactif par l'ébulllition jusqu'à ce que la solution ne dégage plus qu'une odeur faible, on filtre, on lave à l'eau chaude, on fait sécher, on recueille le résidu resté sur le filtre, on le calcine et on le pèse. On obtient : le sable + SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3. Dans le filtrat on peut précipiter et doser la chaux, à moins qu'on ne préfère la doser par la méthode calcimétrique.

Cette méthode de dosage de l'argile est essentiellement une méthode industrielle, sujette à de nombreuses erreurs (précipitation incomplète de l'acide silicique et des sesquioxydes, entraînement de chaux à la précipitation, enlèvement incomplet du chlorure d'ammonium par lavage, etc.) ; mais, la compensation mutuelle de ces erreurs est largement suffisante pour que la méthode soit vraiment utilisable. L'essentiel est de s'assurer au préalable par une analyse parrallèle exacte du degré d'opportunité de cette méthode et de l'importance des erreurs auxquelles elle peut donner lieu. Il faut, en outre, faire en sorte de toujours exécuter l'analyse de la même manière, comme dans les dosages de contrôle.

Cette méthode de dosage est indiquée dans les cas où, pour des

raisons quelconques, le dosage calcimétrique, plusieurs fois réitéré chaque jour, est jugé insuffisant pour le contrôle des matières. Dans les cas où l'on procède une fois par jour ou une fois par semaine à une analyse pondérale exacte pour contrôler les dosages calcimétriques, et c'est là le cas le plus fréquent, il vaut mieux doser séparément la silice et les sesquioxydes par une méthode même abrégée ; on peut alors éventuellement incinérer et peser ensemble les filtres avec la silice et les sesquioxydes.

DOSAGE DE LA MAGNÉSIE

Lorsque les matières premières d'une fabrique de ciment, et notamment les pierres calcaires, contiennent une proportion importante de magnésie, celle-ci est rarement répartie d'une manière uniforme dans la matière brute. On trouve le plus souvent des couches riches en magnésie alternant avec des couches pauvres en magnésie ; on en profite pour mélanger les différentes couches en proportions déterminées pour la fabrication. Dans ces sortes de cas, le chimiste doit avoir soin de contrôler soigneusement la teneur des matières premières en magnésie, vu que le travail dans la carrière est parfois compliqué par la prescription d'abattre les couches en proportions déterminées et que le personnel qui y est occupé a toujours une tendance à s'écarter des règles de conduite qu'on lui donne.

Lorsque la chaux contient une importante proportion de magnésie, celle-ci peut déjà être décelée dans l'essai calcimétrique, car le carbonate de magnésie est attaqué beaucoup plus lentement par l'acide chlorhyrique que le carbonate de chaux. Si, par exemple, le volume de gaz augmente d'une manière lente et continue dans le calcimètre après l'écoulement du temps habituellement nécessaire au dégagement de l'acide carbonique contenu dans le carbonate de chaux ou dans la matière brute employée, on peut en conclure que celle-ci contient du carbonate de magnésie en proportion nuisible au ciment.

Si la matière première contient des couches particulièrement riches en magnésie ou si sa teneur en magnésie oscille généralement aux environs de la limite permise, il est nécessaire de faire régulièrement le dosage de cet élément. On se sert à cet effet de la méthode de Seger et Cramer.

On décompose 2 gr. de la matière soumise à l'analyse avec de

l'acide chlorhydrique dilué, on délaie avec de l'eau, on fait bouillir, on ajoute de l'ammoniaque en excès, ensuite de l'acide oxalique jusqu'à ce qu'il ne se forme plus de précipité ; on verse le tout dans un ballon de 1 litre, on fait refroidir rapidement, on complète jusqu'au trait et on agite énergiquement. Au bout d'un certain temps, lorsque le dépôt s'est formé dans le ballon (SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3 + CaO), on décante 500 cm³ du liquide surnageant et on le filtre. Dans le filtrat, on précipite la magnésie par une addition d'ammoniaque et de phosphate de soude. Si l'on fait la précipitation dans des vases cylindriques, on peut avec un peu d'habitude évaluer facilement la quantité de magnésie précipitée. Différemment, ou si l'on veut opérer avec une grande précision, on pèse le précipité de la manière habituelle. Il correspond naturellement à 1 gr. de la prise d'essai.

J.-J. Porter a proposé une méthode rapide pour se rendre compte si une pierre calcaire est riche en magnésie. Cette méthode ne convient pas pour une analyse rigoureusement exacte, mais elle convient très bien pour les essais préliminaires.

On réduit la pierre calcaire en poudre dont on verse 0 gr. 5 dans un tube à expériences, on y ajoute 1 gr. 75 d'acide chlorhydrique (obtenu par le mélange de parties égales d'eau et d'acide chlorhydrique de densité 1,2), on neutralise avec du carbonate de calcium pur ; lorsque l'acide carbonique cesse de se dégager on fait bouillir jusqu'à expulsion complète de ce gaz. On complète ensuite avec de l'eau jusqu'au trait de 10 cm³ du verre et on agite.

Pendant ce temps, on a versé dans un second tube à expériences 1,5 cm³ de solution sucrée saturée et 1 cm³ de solution de potasse (30 gr. KOH dans 100 gr. d'eau), complété avec de l'eau jusqu'à la marque de 10 cm³ et on a bien mélangé le tout.

On filtre donc la première solution et reçoit le filtrat dans l'éprouvette contenant la seconde solution. Si la première contient de la magnésie, il se formera au point de contact des deux liquides un précipité d'hydrate de magnésie. On laisse bien égoutter le filtre et on mélange les deux solutions en agitant.

De la quantité de précipité finement réparti dans la solution on déduit, par comparaison avec des précipités analogues fournis par des calcaires à teneur connue en magnésie, la teneur en magnésie de la matière soumise à l'analyse.

Pour des teneurs en magnésie supérieures à 4 %, la méthode est en défaut, parce qu'alors le précipité est trop volumineux.

ANALYSE DES BOUES DE DÉLAYAGE

Nous avons vu plus haut que les matières premières doivent être réduites à une finesse uniforme, et qu'on les amène à cette finesse par broyage ou par délayage.

Le contrôle de l'argile se réduit aux opérations suivantes : on prélève sur différents points du dépôt d'argile de petits fragments de cette matière (dont la grosseur varie de celle d'une noisette à celle d'une noix).

On fait bouillir 50 grammes de ces fragments dans 1 à 2 litres d'eau, on abandonne la solution à elle-même pendant une journée si c'est nécessaire, puis on la fait bouillir de nouveau. Lorsque la masse principale de l'argile est désagrégée, ce qu'on obtient en écrasant les grumeaux à l'aide d'une baguette de verre garnie d'un tube en caoutchouc, on agite énergiquement la matière ainsi délayée, on laisse déposer, puis on la fait passer sur un tamis à 4.900 mailles par cm²; le refus du tamis est ramené dans le vase qui a servi à faire bouillir la matière et soumis à une nouvelle ébullition. On renouvelle les mêmes opérations jusqu'à ce qu'on n'obtienne plus de refus sur le tamis ou que ce refus ne forme plus qu'un résidu granuleux (quartz, débris de feldspath, mica, pyrites, gypse, carbonates, etc.).

On fait sécher ce refus et on le pèse. S'il est en petite quantité (environ 1 %) et en grains très fins, on peut ne pas en tenir compte. S'il est en quantité relativement importante et à l'état de gros grains il est nécessaire de l'examiner de plus près (à l'aide du microscope, de l'analyse). S'il se compose de quartz ou de sable de quartz, et s'il se trouve en quantité appréciable, on n'aura à en tenir compte dans la confection du mélange sur la base du module hydraulique qu'autant qu'il représente de la matière inerte, et dans ce cas il faut le retrancher de la quantité d'argile à mettre en œuvre.

Si le résidu se compose d'une proportion importante de pyrites sulfureuses, il sera nécesaire de traiter l'argile par délayage dans la fabrication. Il arrive souvent que l'argile contient des fragments plus ou moins gros de pierre calcaires dont la présence dans les matières premières ne présente pas d'inconvénients si

elles sont réduites en poudre fine. Dans ces conditions, l'argile doit être traitée par délayage ou soumise au broyage à l'aide des machines que nous avons décrites dans le corps de l'ouvrage.

Il n'est guère possible de formuler des règles générales relativement à la finese et à la quantité de résidus que laisse l'argile dans les bassins de délayage ; il sera le plus souvent nécessaire de faire un essai de cuisson en petit pour se rendre compte jusqu'à quel point ces résidus peuvent nuire à la qualité du ciment.

Il est clair qu'en cours de fabrication, le contrôle de la finesse de l'argile est beaucoup plus simple lorsqu'elle vient d'être délayée, car il n'est pas nécesaire alors de soumettre la matière à l'ébullition. Il suffit de prendre un volume déterminé de la boue de délayage, de la délayer dans l'eau, de la verser sur le tamis, de laver, sécher et peser le refus si c'est nécessaire.

ESSAI DE CUISSON ET CALCUL DES MATIÈRES PREMIÈRES

Pour déterminer la proportion du mélange des matières premières nécessaires pour obtenir un module hydraulique donné, il faut tenir compte d'une part de la teneur de la pierre calcaire en silicates, de l'autre de la teneur de l'argile en chaux ; pour les marnes il faut connaître le rapport existant entre la chaux et la substance argileuse. On se sert à cet effet de la formule de Hauenschild-Schoch :

$$\text{Pierre calcaire} = \frac{m \times s \times c}{C - m \times S} \times \text{argile},$$

m étant le module hydraulique, s la teneur en silicates de l'argile, c la teneur en chaux de l'argile, C la teneur en chaux de la pierre calcaire et S la teneur en silicates de la pierre calcaire.

Pour se rendre compte de la manière dont une matière première nouvelle se comportera à la fabrication, on en prépare trois mélanges, savoir : un mélange à module hydraulique faible (1,8), un mélange à module hydraulique moyen (2,0), et un mélange à module hydraulique élevé (2,2). On soumet d'abord à la cuisson le mélange à module moyen, et s'il ne donne pas de résultats satisfaisants, on fait cuire l'un des deux autres ou tous les deux. Il peut être nécessaire alors de préparer encore et de faire cuire un autre mélange pour la confection duquel on tiendra compte des indications fournies par les essais de cuisson. La proportion du mélange ainsi établie aura besoin d'être encore modifiée en

marche industrielle, car la finesse du broyage, la confection du mélange et la température de cuisson, qui influent considérablement sur les propriétés du ciment, ne sont jamais les mêmes dans un essai en petit que dans la fabrication industrielle. Quoi qu'il en soit, l'essai de cuisson renseignera toujours sur la qualité des matières premières et permettra d'abréger considérablement la période de tâtonnements de l'usine.

Les matières premières employées à cet effet doivent être réduites à la même finesse que dans la fabrication, ce qui, pour des quantités un peu importantes, ne peut être réalisé qu'à l'aide de broyeurs de laboratoire mus au moteur; elles doivent être ensuite mélangées à fond, ce qu'on obtient le mieux en les faisant repasser ensemble au broyeur, humectées convenablement, réduites en boules de la grosseur d'un œuf de poule, et séchées. Il est clair que le mode de préparation des matières doit être basé sur les mêmes principes que dans la fabrication en grand. Si, par exemple, l'usine se propose d'installer le délayage, les matières servant à l'esai de cuisson doivent être préparées d'après le même procédé. En outre, il est indispensable de contrôler la finesse des matière en les faisant passer sur un tamis fin, d'analyser le fin et le refus du tamis, car leur composition présente toujours des différences sensibles.

L'essai de cuisson se fait dans un petit four de laboratoire, tel que celui représenté par la figure 185. A est une maçonnerie en briques réfractaires, B une maçonnerie en briques ordinaires, C un four cylindrique ouvert au haut et au bas, D une voûte en pierres, E le cendrier, F le tuyau qui fait communiquer le four avec la cheminée, G une grille en barres de fer placées sur des supports en fer scellés dans la maçonnerie, H le régulateur de tirage, J et K sont des plaques de chamotte ou de béton servant à ouvrir et à fermer le four suivant les besoins.

Pour faire la cuisson des matières, on allume le feu sur la grille G avec du bois et du charbon, puis on alimente avec du coke. Lorsque le coke est bien pris, on en met une couche de 10-15 cm. sur laquelle on place une couche de boules faites avec des matières premières destinées à la fabrication du ciment. Par-dessus cette couche, on met une nouvelle couche de coke, moins épaisse que la première, puis une nouvelle couche de boules et enfin une épaisse couche de coke. Celui-ci doit être exempt de pous-

sier, sinon on n'aurait pas un tirage convenable. Pour bien répartir les boules sur le feu on se sert d'une pince qu'on aura fait fabriquer dans ce but. Pendant qu'on charge le four de coke et de boules, on ferme le cendrier avec la plaque K, et on ouvre le tiroir H.

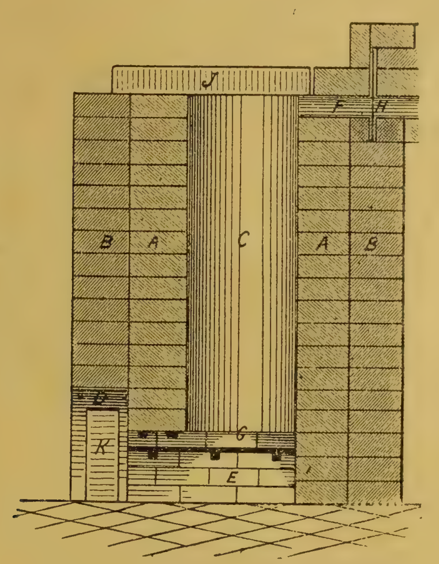


Fig. 185. — Petit four de laboratoire

La quantié de coke, la régulation du tirage, etc., dépendent des conditions locales et nous ne nous y arrêterons pas. Lorsque la cuisson est achevée, ce qui a lieu au bout de 2-3 heures, on ouvre H et K pour activer le tirage, on laisse refroidir le four, puis on retire les clinkers, on les débarrasse des scories adhérentes à l'aide d'un marteau, on les concasse et les broie finement à l'aide d'un moulin.

On se sert également de fours électriques dans lesquels le chauffage peut être réglé très exactement ; ils présentent l'avantage de produire un ciment exempt de scories.

ANALYSE CHIMIQUE

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

Pour l'analyse des argiles, on emploie souvent encore la méthode dite rationnelle, qui consiste à doser le silicate d'alumine (substance argileuse). Mais, on peut affirmer qu'il n'existe pas une seule méthode d'analyse rationnelle qui fournisse des résultats exacts, comparables entre eux ; cette méthode n'est d'ailleurs nullement nécessaire dans une fabrique de ciment où l'essentiel n'est pas de savoir combien une argile contient de substance argileuse, mais uniquement de connaître la composition chimique du mélange brut.

Avant de faire l'analyse quantitative d'une argile ou d'un ciment dont on ignore la composition, il est nécessaire de les soumettre à une analyse qualitative dans laquelle il y a lieu de rechercher spécialement la présence du titane et du manganèse. On peut négliger la recherche de la magnésie et des alcalis, dont le dosage n'est d'ailleurs à sa place qu'à la fin de l'analyse quantitative. Il n'est pas nécessaire non plus de rechercher le soufre et l'acide sulfurique, car on atteint le même but par l'analyse quantitative en se basant sur la moyenne de nombreuses analyses.

L'analyse des silicates, quelque simple qu'elle paraisse, doit être faite avec le plus grand soin pour donner des résultats exacts. Car, d'un côté certaines parties de la prise d'essai peuvent échapper à la solubilisation, la précipitation de la silice peut entraîner celle d'autres matières, de sorte que la quantité de silice trouvée est trop grande ; d'un autre côté, il peut rester un peu de silice en dissolution et se précipiter avec l'alumine ou avec la chaux, etc. On ne peut se prémunir contre ces causes d'erreur qu'en opérant avec une rigoureuse exactitude. Il est clair dès lors que tout précipité doit être contrôlé au point de vue de sa pureté, et que toute substance entraînée par la précipitation d'une autre doit être

précipitée à son tour et ajoutée à la fraction principale. Cette précaution doit être observée également dans les analyses parallèles, la même méthode donnant forcément lieu aux mêmes erreurs.

Il est d'autant plus urgent de soigner le travail d'analyse des matières premières destinées à la fabrication du ciment et du ciment achevé, que cette analyse a pour but de renseigner non sur leur teneur en un élément déterminé, mais en première ligne sur le rapport existant entre différents éléments (silice et sesquioxydes : chaux ou silice : sesquioxydes), de sorte que chaque erreur pèse doublement sur les résultats.

Rappelons, pour dissiper une erreur très répandue parmi certains chimistes, que toute abréviation dans l'exécution de l'analyse de l'argile et du ciment est condamnable, exception faite pour les analyses de contrôle à faire tous les jours en cours de fabrication et qui sont basées elles-mêmes sur l'analyse exacte des mêmes matières à l'état brut. Seule l'analyse rigoureusement exacte des silicates peut donner des résultats pratiquement utilisables. On commettrait une grave erreur si l'on voulait donner son opinion motivée sur la composition d'une argile, d'une marne, d'une pierre calcaire ou d'un ciment en se basant uniquement sur la détermination de l'argile, sur les déterminations calcimétriques et les titrages. Ces sortes de méthodes, encore une fois, conviennent très bien pour les analyses de contrôle en cours de fabrication, en tant qu'elles sont basées elles-mêmes sur la connaissance exacte des matières mises en œuvre après analyse. Ainsi il est clair sans plus que le dosage calcimétrique d'une pierre à chaux qui contient plusieurs centièmes de silicates, peut indiquer néanmoins 100 % de carbonate de chaux lorsque cette pierre à chaux contient des proportions élevées de magnésie ou d'alcalis.

Il n'existe pas actuellement de méthode unifiée pour le mode de calcul des résultats d'analyses. Une méthode de ce genre serait très utile, car elle rendrait les résultats comparables et leur donnerait plus de valeur.

Pour le ciment Portland et les ciments naturels, on peut adopter le mode de calcul suivant, qui donnerait satisfaction à toutes les exigences et se rapprocherait sensiblement des usages existants :

1° La perte à la calcination et le résidu insoluble dans l'acide

chlorhydrique doivent être déterminés dans le ciment de livraison et indiqués à part. Le calcul de l'analyse soit se baser sur la matière calcinée ;

2° L'analyse doit comprendre, en outre, le dosage des éléments suivants :

Silice.	Chaux.
Titane.	Magnésie.
Alumine.	Alcalis totaux.
Oxyde de fer.	Soufre total moins acide sulfurique.
Protoxyde de fer.	
Protoxyde de manganèse.	Acide sulfurique.

La perte à la calcination doit faire l'objet d'une mention à part, non seulement parce qu'elle donne lieu à des pertes, mais encore parce que la fixation d'oxygène peut donner lieu à une augmentation de poids, et que l'importance de la perte au feu peut être modifiée par un silotage prolongé (absorption d'eau et d'acide carbonique), ou par des mélanges fortuits (résidu de charbon, etc.) et par d'autres causes encore.

Pour les mêmes raisons, l'insoluble doit être indiqué à part, puisque le calcul doit indiquer directement la composition des éléments hydrauliques. Si l'insoluble ne dépasse pas 0,3 ou 0,4 %, on peut l'ajouter à la silice en mentionnant ce fait; mais, lorsqu'il s'agit de proportions importantes (ce qui arrive pour tous les ciments autres que le Portland), il est nécessaire d'en faire l'analyse qualitative, microscopique ou quantitative.

L'oxyde et le protoxyde de fer doivent être indiqués séparément, car il y a de sérieuses raisons pour ranger l'oxyde parmi les éléments acides et le protoxyde parmi les éléments basiques.

La détermination des alcalis totaux est assez facile à exécuter pour qu'on les fasse figurer dans les analyses qui présentent de l'importance. En tout cas, on ne devra jamais désigner comme alcali, mais sous la rubrique « non dosé », le manquant sur 100 d'alcalis.

Il est nécessaire de distinguer le soufre à l'état de sulfate et le soufre à l'état de sulfure, d'abord parce que si l'on faisait entrer ce dernier en compte comme trioxyde de soufre, il figurerait pour le triple de son importance réelle.

Pour ne pas compliquer inutilement notre travail, nous nous contenterons de donner ici la marche à suivre pour l'analyse

quantitative d'un silicate au point de vue de la fabrication du ciment d'après la méthode de Cl. Richardson et W.-F. Hillebrand.

ANALYSE QUANTITATIVE D'UN SILICATE. — DOSAGE DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS

(SiO^2, Al^2O^3, Fe^2O^3, CaO, MgO, TiO^2, MnO).

Lorsqu'il s'agit de ciment Portland, celui-ci doit être préalablement dissous.

Le ciment Portland est soluble dans l'acide chlorhydrique dilué ; la solution, presque claire, présente une coloration qui va du jaune pâle au jaune foncé ; elle ne tarde pas à se gélatiniser. La dissolution ne doit donner lieu à aucun dégagement de gaz.

Les argiles, les scories de haut-fourneau, les marnes, le ciment romain, les matières brutes, etc., doivent être également solubilisés en vue de l'analyse. Pour solubiliser les pierres calcaires, les marnes et les matières premières pour ciment Portland, on chauffe les échantillons pendant 15 minutes au creuset de platine en activant la flamme par soufflage.

Les matières riches en silicates, telles que les argiles, les ciments romains riches en alumine, etc., qui ne peuvent être solubilisées par simple calcination, sont fondues au creuset de platine avec une quantité quadruple de carbonate de soude et de potasse, jusqu'à cessation de tout dégagement de CO^2 et obtention d'une fonte liquide.

Dissolution. — Le ciment Portland et les échantillons solubilisés par calcination au creuset de platine sont dissous dans un becherglass, recouvert d'un verre de montre, avec 10 cm^3 d'acide chlorhydrique et 50 cm^3 d'eau. S'il reste une partie indissoute, quand il s'agit de ciment Portland on l'élimine par filtration, on la calcine et la pèse ; quand il s'agit de l'analyse de matières premières on la fait dissoudre avec du carbonate de soude et de potasse, ensuite dans l'acide chlorhydrique et on ajoute la dissolution à celle obtenue en premier lieu.

On procède de même pour dissoudre la fonte obtenue avec le carbonate de soude et de potasse. Le creuset de platine encore incandescent est refroidi extérieurement avec de l'eau pour faciliter le détachage de la matière, ensuite il est placé avec son couvercle dans une capsule de platine et recouvert d'eau. Lorsque la

dissolution est assez avancée, et que toute la masse est ramollie, on ajoute de l'acide chlorhydrique lentement et avec précaution. S'il se trouvait dans la masse un résidu indissous (granuleux), on le ferait dissoudre séparément et on ajouterait à la solution principale la solution ainsi obtenue.

SILICE

On verse dans une capsule de platine la dissolution obtenue avec l'acide chlorhydrique et on la chauffe pendant 15 minutes au bain-marie bouillant; ensuite, on enlève le verre de montre, on le rince et ajoute l'eau de rinçage dans la capsule. On évapore, on humecte le contenu de la capsule avec 5-10 cm³ d'acide chlorhydrique concentré, puis on l'arrose de beaucoup d'eau et on le chauffe pendant 10 minutes au bain-marie bouillant, le verre de montre étant placé sur la capsule.

Les anciennes méthodes d'analyses des silicates prescrivaient l'humectation réitérée avec de l'acide chlorhydrique dilué et le chauffage réitéré plusieurs fois à une température de 110° et même 150° C. Le but cherché, qui est de séparer le SiO^2 à l'état absolument insoluble, ne peut être atteint complètement. Le chauffage, notamment à une température supérieure à 110°, présente en outre des inconvénients, surtout par la formation de silicates ; c'est pourquoi il paraît préférable de l'omettre.

On sépare la silice précipitée de la solution par filtration et on la lave à l'eau chaude jusqu'à ce que l'eau de lavage ne donne plus la réaction du chlore. Le filtrat est évaporé à sec, et le résidu est repris avec de l'acide chlorhydrique et de l'eau. Les restes de silice qui n'entrent pas alors en solution sont recueillis sur un filtre à part, lavés et réunis dans un creuset de platine avec la fraction principale de silice obtenue en premier lieu. Après incinération des filtres, on fait calciner pendant 30 minutes avec soufflage, puis on pèse et on vérifie la constance du poids par calcination pendant 10 minutes.

On contrôle la pureté de la silice dans le creuset en l'humectant avec quelques cm³ d'eau, ajoutant ensuite jusqu'à 10 cm³ d'acide fluorhydrique, 4 gouttes d'acide sulfurique et évaporant sur un bec à petite flamme. Si l'on obtient un résidu insignifiant, on peut le négliger dans les analyses qui n'ont pas besoin d'une exactitude rigoureuse; dans les analyses exactes, et dans les cas

où la solubilisation a été faite avec le carbonate de soude et de potasse, on lave le résidu, on le calcine, on le pèse et on le retranche de la quantité de silice trouvée. Il se compose le plus souvent d'alumine; on l'ajoute alors à celle-ci.

D'ún autre côté, on ajoute à la silice la fraction qui se précipite avec l'alumine.

ALUMINE, OXYDE DE FER ET OXYDE DE TITANE

Le filtrat de la silice (formant environ 1/4 de litre), quand il contient du protoxyde de fer, est additionné d'une goutte d'acide azotique ou d'un peu d'eau chlorée, puis alcalinisé avec de l'ammoniaque. On chasse l'ammoniaque en excès par l'ébullition, jusqu'à ce que le liquide ne dégage plus qu'une faible odeur.

(Pour les analyses exactes, la solution ammoniacale doit être préparée chaque fois au moment de son emploi, car elle contient souvent une proportion appréciable d'acide silicique).

La majeure partie de la solution est ensuite séparée du précipité par décantation sur un filtre, le précipité est lavé à l'eau d'abord dans le becherglass, ensuite sur le filtre, puis dissous dans de l'acide chlorhydrique chaud, et versé de nouveau dans le becherglass dont on s'est servi tout d'abord. On recommence la précipitation par l'ammoniaque, on recueille le précipité sur le filtre qui a servi à la première précipitation et on le lave à l'eau chaude. Le filtre et le précipité, encore humides, sont placés dans le creuset de platine, incinérés et calcinés pendant 10 minutes avec soufflage; on fera en sorte que la flamme ne soit pas réductrice.

Pour doser l'oxyde de fer, on fait fondre à une température aussi basse que possible, avec 10 gr. de sulfate acide de potasse, le mélange d'oxydes qui se trouve dans le creuset de platine, on reprend avec de l'eau bouillante et de l'acide sulfurique dilué et on fait chauffer pendant 10 minutes au bain-marie bouillant.

Lorsqu'il s'agit d'une analyse exacte, s'il se forme un précípité il est éliminé par filtration, calciné et pesé. Si l'épreuve par l'acide fluorhydrique montre que c'est de l'acide silicique, on le comptera comme tel.

Le filtrat est ensuite réduit avec du sulfure d'hydrogène, filtré dans un ballon pour éliminer la majeure partie du platine dissous; on introduit dans le ballon un courant d'acide carbonique, on en chasse l'excès par ébullition dans un courant d'acide car-

bonique. On dose l'oxyde de fer par titrage avec du permanganate de potasse et on le retranche du total (Al^2O^3 + Fe^2O^3) obtenu auparavant.

Pour l'analyse volumétrique du fer, la solution doit contenir au moins 2,5 % d'acide sulfurique. On la dilue avec de l'eau bouillie à environ un 1/2 litre, puis, à l'aide de la burette on y fait arriver de la solution de permanganate jusqu'à coloration rose. 1 cm^3 de la solution déci-normale de permanganate de potasse correspond à 0,00799 gr. Fe^2O^3.

Oxyde titanique. — Si la matière contient de l'oxyde titanique (qui dépasse rarement 2 % dans les matières premières du ciment), on en fait le dosage par la méthode colorimétrique de Weller.

A cet effet, le précipité calciné et pesé, qui contient l'oxyde de fer et l'alumine, ainsi que l'oxyde titanique, est solubilisé par fusion suivant la méthode indiquée plus haut, la matière fondue est dissoute dans de l'eau additionnée d'acide sulfurique, la solution est débarrassée par filtration de traces éventuelles d'acide silicique, et ensuite partagée en deux fractions. Dans l'une on dose l'oxyde de fer, dans l'autre l'oxyde titanique. Pour ce dernier dosage, on ajoute un peu d'acide phosphorique; la solution doit contenir au moins 5 % d'acide sulfurique.

De cette solution, préalablement amenée à un volume déterminé et mesurée dans un ballon gradué, on verse 50 cm^3 dans un cylindre de Nessler, et on place à côté de celui-ci une série des mêmes cylindres remplis jusqu'au trait (50 cm^3) de quantités mesurées de solution normale (1) et d'eau, on ajoute au contenu de chaque cylindre 2 cm^3 d'une solution de peroxyde d'hydrogène à 3 %, exempte de fluorure d'hydrogène (2) et on compare la coloration des solutions analysées avec celle des solutions normales.

A cet effet, on place les cylindres de Nessler sur du papier

(1) 0 gr. 6003 de florure titano-potassique obtenu par une série de recristallisations et calciné (correspondant à 0 gr. 2 TiO^2) sont traités à plusieurs reprises dans un creuset de platine avec de l'acide sulfurique concentré et quelques gouttes d'eau, le résidu sec est dissous dans un peu d'acide sulfurique concentré et dilué à 100 cm^3 avec de l'acide sulfurique froid à 5 %.

(2) Préparée peu avant l'emploi avec du peroxyde de sodium par dissolution dans de l'acide sulfurique dilué.

blanc afin de pouvoir mieux discerner l'intensité de la coloration. Les quantités de solution normale versées dans les cylindres comparatifs sont proportionnées à la teneur présumée des échantillons. Si, par exemple, on opère sur une prise d'essai de 1 gr., on ne doit guère compter plus de 2 % de TiO^2. Si donc les 50 cm^3 employés pour l'examen colorimétrique représentent la 4e partie du précipité d'alumine-fer-titane, ils peuvent contenir jusqu'à o gr. 005 TiO^2. 1 cm^3 de la solution normale contient o gr. 002 TiO^2, 1/2 cm^3 en contient donc o gr. 001. On mettra donc dans les cylindres comparatifs 0,5, 1, 1,5 et 2 cm^3 de solution normale, correspondant à o gr. 001, o gr. 002, o gr. 003, o gr. 004, o gr. 005 TiO^2.

La quantité de TiO^2 trouvée de cette manière dans les 50 cm^3 permet de calculer aisément la quantité totale, qu'on retranchera du poids (Al^2O^3 + Fe^2O^3 + TiO^2).

On peut également déterminer l'acide titanique par l'analyse pondérale d'après la méthode de G. Becker (3).

Chaux. — On réunit les filtrats et les eaux de lavage des deux précipitations des sesquioxydes, on y ajoute quelques gouttes d'ammoniaque et on les porte à l'ébullition. A la solution bouillante on ajoute 10 cm^3 de solution saturée d'oxalate d'ammoniaque et on continue à faire bouillir jusqu'à ce que le précipité prenne une consistance granuleuse, on laisse déposer pendant au moins 20 minutes et on filtre. On fait ensuite sécher le filtre et on l'incinère, puis on fait dissoudre la chaux dans de l'acide chlorhydrique dilué, on dilue la solution à 100 cm^3 avec de l'eau et la fait bouillir après addition d'un léger excès d'ammoniaque.

(Les traces d'alumine qui se précipitent alors sont éliminées par filtration et, si l'analyse doit être très exacte, elles sont calcinées, pesées et ajoutées à la quantité principale d'alumine).

On précipite la chaux de la solution avec de l'oxalate d'ammoniaque comme précédemment, puis on laisse reposer, on filtre, on lave à l'eau et on en fait le dosage dosimétrique ou pondéral.

Pour l'analyse dosimétrique, on lave à l'eau le filtre sur lequel on a recueilli le précipité d'oxalate de calcium et on réunit celui-ci avec l'eau de lavage dans un becherglass, et finalement on rince le filtre avec de l'acide sulfurique dilué. Ensuite on ajoute en-

(3) Tonind. Ztg 1902, p. 571.

viron 20 cm³ d'acide sulfurique à 50 % et on complète à 300 cm³ avec de l'eau chaude, puis on fait le titrage avec une solution déci-normale de permanganate de potasse, dont 1 cm³ correspond à 0 gr. 002807 de CaO.

On fait l'analyse pondérale soit simplement par calcination et pesage de l'oxyde de calcium, ou bien on transforme la chaux en sulfate par calcination de l'oxalate et addition d'acide sulfurique dilué à l'oxyde obtenu. Après évaporation de l'eau et de l'acide sulfurique, on calcine le sulfate de calcium à une chaleur modérée (au rouge) et on le pèse. Calciné à une température trop élevée, le sulfate se décomposerait.

Magnésie. — On réunit les eaux des deux précipitations de la chaux, on y ajoute de l'acide chlorhydrique et on les ramène à 100 cm³ par évaporation. A la solution bouillante on ajoute une solution saturée de phosphate de soude ammoniacal, jusqu'à ce qu'il ne se forme plus de précipité, puis on fait bouillir pendant quelques minutes. Pour précipiter également les « restes » de magnésie en dissolution, on fait refroidir complètement la solution et y ajoute 1/3 de son volume d'ammoniaque à 10 % en agitant énergiquement. Le précipité, qui précédemment était amorphe, devient cristallin et le reste de magnésie cristallise à l'état de phosphate double de magnésie et d'ammoniaque.

On laisse reposer pendant plusieurs heures, on filtre, on fait dissoudre le précipité dans de l'acide chlorhydrique dilué, chaud, on complète à 100 cm³ et on recommence la précipitation de la même manière que la première fois. Au bout de deux heures on peut éliminer le précipité par filtration, calciner et peser.

La calcination peut se faire au creuset de platine. Le filtre doit être incinéré séparément (dans la spirale en platine) ; on le chauffe lentement, puis finalement on le calcine à feu intense avec soufflage et jusqu'à poids constant.

1 gr. du pyrophosphate de magnésie obtenu ($Mg^2P^2O^7$) correspond à 0 gr. 1812 MgO.

DÉTERMINATION DES ALCALIS (MÉTHODE BERZÉLIUS)

Comme les matières mises en œuvre dans les fabriques de ciment ne contiennent généralement que de faibles quantités d'alcalis, on opère sur une prise d'essai de 3-5 gr. de substance, on y ajoute environ 1 cm³ d'acide sulfurique concentré par chaque

gramme de matière, on mélange avec une tige de platine, on laisse refroidir, on ajoute 15-20 cm³ d'acide fluorhydrique pur concentré, et on mélange bien le tout. On évapore ensuite au bain-marie en agitant de temps en temps, on chasse la majeure partie de l'acide sulfurique, de manière que la masse ne forme plus qu'une pâte. On laisse refroidir, on rince dans un becherglass le contenu de la capsule préalablement arrosé d'eau, puis on étend d'eau à 1/2 litre. Lorsque la dissolution est parfaite, on ajoute du chlorure de baryum en léger excès et ensuite, sans filtration préalable, de l'ammoniaque et du carbonate d'ammoniaque.

La solution ne contient alors que du chlorure de magnésie et les chlorures alcalins. On la décante, on la lave plusieurs fois par décantation, en dernier lieu sur le filtre, et on évapore le filtrat au bain-marie. Le filtrat concentré est versé dans la capsule de platine et évaporé jusqu'à siccité. On en chasse les sels ammoniacaux par une calcination faible. On reprend le résidu avec quelques gouttes d'acide chlorhydrique dilué et un peu d'eau, et on ajoute de l'eau de baryte jusqu'à réaction alcaline. On fait bouillir pendant quelques instants, on élimine la magnésie par filtration, et au filtrat on ajoute de l'ammoniaque et du carbonate d'ammoniaque et on fait bouillir : le baryum se précipite alors sous forme de carbonate ; ensuite on évapore jusqu'à siccité la solution filtrée. On recommence cette opération à plusieurs reprises s'il y a lieu, jusqu'à ce que la matière calcinée et reprise avec de l'eau ne se trouble plus quand on l'essaie avec les réactifs. On évapore encore jusqu'à siccité, on calcine faiblement, on humecte avec quelques gouttes d'acide chlorhydrique, on chasse celui-ci par évaporation, on calcine de nouveau et on pèse. La quantité de matière obtenue à la pesée donne la somme des chlorures alcalins et des traces de chlorure d'ammonium.

En dosant ensuite le chlore on trouvera facilement la somme de K^2O et de Na^2O. Le dosage indirect et le dosage séparé des deux oxydes ne présentent aucune importance pour l'industrie du ciment.

DÉTERMINATION DE L'ANHYDRIDE SULFURIQUE

Pour déterminer l'acide sulfurique, il est nécessaire de solubiliser les silicates insolubles par fusion avec du carbonate de soude ou de soude et de potasse ; les silicates solubles, tels que le ci-

ment Portland, sont dissous directement dans l'acide chlorhydrique. On opère sur 1-2 gr., suivant la teneur présumée en acide sulfurique.

De la solution acidifiée avec de l'acide chlorhydrique on élimine la silice précipitée, et après lavage on la complète à 250-300 cm³ et on la soumet à l'ébullition. A la solution bouillante on ajoute goutte à goutte de la solution de chlorure de baryum en excès, on continue à faire bouillir jusqu'à ce que le précipité soit devenu granuleux. On laisse alors reposer pendant quelques heures (le mieux pendant la nuit), puis on filtre, on humecte avec quelques gouttes d'acide sulfurique, on calcine et on pèse le $BaOSO^4$ ainsi obtenu, dont 1 gr. correspond à 0 gr. 343 SO^3.

Pour les analyses exactes, il est nécessaire, avant de faire la précipitation avec le chlorure de baryum, de précipiter également l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux de la manière habituelle par de l'ammoniaque et du carbonate d'ammoniaque, vu que le sulfate de baryum en englobe parfois une certaine partie, ce qui fait qu'on obtient alors des résultats trop faibles.

En outre, si l'on veut également doser le soufre à l'état de sulfures, il faut faire la dissolution et l'ébullition dans un courant d'acide carbonique afin d'éviter l'oxydation ou l'évaporation du sulfure d'hydrogène.

DÉTERMINATION DU SOUFRE TOTAL

La matière soumise à l'analyse, lors même qu'elle est soluble dans l'acide chlorhydrique, est mise à fondre avec de la soude et un peu de nitrate de potasse (les gaz de la flamme ne doivent pas pénétrer dans le creuset), la matière fondue est ensuite dissoute dans l'eau chaude, puis précipitée avec du sulfate de baryum de la manière décrite plus haut. On peut également oxyder le soufre à l'état de sulfure en arrosant la matière avec de l'eau bromée, l'acidifiant avec de l'acide chlorhydrique, etc.; ou en ajoutant à la substance du chlorate de potasse, ensuite de l'acide azotique et décomposant par l'acide chlorhydrique.

Dans un cas comme dans l'autre on obtient le soufre total (sulfates et sulfures) comme SO^3. Si de cette valeur on retranche celle trouvée précédemment pour le soufre à l'état de sulfate on obtient séparément les parties afférentes à S et SO^3.

DÉTERMINATION DE LA PERTE AU FEU

Pour déterminer la perte au feu on opère sur la matière préalablement séchée à 110-120° C, exception faite pour les ciments du commerce. On fait calciner dans le creuset de platine pendant 15 minutes sur une flamme vive activée par le soufflage et laisse refroidir dans l'exsiccateur. On renouvelle la calcination toutes les 5 minutes chaque fois jusqu'à poids constant.

(La calcination ne donne pas seulement lieu à une perte de poids résultant du départ de CO^2 et de H^2O, mais encore à une augmentation de poids par oxydation des sulfures et du protoxyde de fer. Dans les analyses de ciment, la perte au feu doit toujours être déterminée à part et le reste de l'analyse ramené à la matière calcinée).

DÉTERMINATION DE L'ACIDE CARBONIQUE

Lorsqu'il s'agit de faire un dosage plus exact de l'acide carbonique que celui obtenu à l'aide du calcimètre, on peut employer avantageusement la méthode élaborée par Lunge et Marchlewsky. L'appareil créé par eux à cet effet permet de se passer des tables de correction.

A est un ballon de 30 cm^3 dans lequel se fait le dégagement de l'acide carbonique ; il communique avec un entonnoir de remplissage par un petit ajutage latéral *a* et le robinet *b*. Il communique, en outre, avec l'appareil mesureur par le tube *d*. Le tube mesureur B a une capacité de 150 cm^3 et est gradué en dixièmes de cm^3 à partir de la boule. Il porte à sa partie supérieure un robinet de verre *f* à deux voies, dont l'une le fait communiquer avec le tronçon qui est relié au tube *e* et l'autre avec le tronçon *g* relié avec le tube *m* et le tube d'absorption E. Le tube *m* porte un robinet *h* à deux voies Le tuyau d'absorption E porte au sommet de sa seconde branche un tube garni de chaux sodée *i*. E est rempli à un peu plus de moitié d'une solution de soude caustique (1 partie de NaOH et 3 parties d'eau). Le tube de réduction C porte une partie évasée cylindrique et est terminé par un tube capillaire *k* ; sa partie rétrécie porte une graduation de 100-130 cm^3. Le tube indicateur de niveau D a un diamètre plus grand que les autres et est ouvert à sa partie supérieure. Les tubes B, C et D remplis de mercure communiquent entre eux au moyen de joints en caoutchouc et d'une pièce en T. B E

sont fixés solidement sur le cavalier, tandis que C et D sont fixés à l'aide d'une pince mobile l, de manière qu'on puisse les hauser ou les baisser ensemble ou séparément.

Montage de l'appareil. — On remplit B, C et D environ à moitié de mercure, en ouvrant le robinet f de manière à mettre B en communication avec l'air extérieur. Ensuite on verse dans C une goutte d'eau et, en modifiant la position de D on règle le niveau du mercure en C de la manière que nous indiquerons plus loin. On lit la température t sur un thermomètre suspendu à côté de C et la pression barométrique b (1). On trouve le niveau que doit atteindre le mercure en C en introduisant dans l'équation suivante les valeurs lues ou corrigées :

$$\frac{100 \times (273 + t) \times 760}{273\,(b - t + 2)}$$

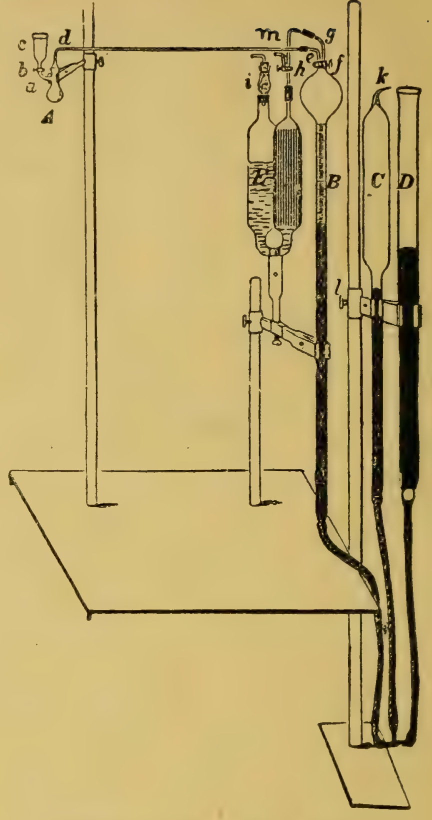


Fig. 186. — Appareil de Lunge et Marchlewski pour le dosage de l'acide carbonique

Quand on a porté le mercure au niveau ainsi établi, on ferme le tube capillaire k par soudure à la flamme. L'appareil est alors réglé de manière que le tube de réduction C contienne une quantité d'air humide qui, à l'état sec, à 0° C et 760 mm. de pression, occuperait exactement 100 cm³. Dans ces conditions, on n'a pas besoin de tables de réduction.

Exécution du dosage. — On s'assure d'abord par un essai en blanc (exécuté dans les mêmes conditions que le dosage proprement dit) que les différents joints sont bien étanches, vu que

(1) On retranche 1 mm. pour des températures inférieures à 12° C, 2 mm. à 13-19 et 3 mm. à 20-25°. C.

après achèvement de l'essai les chiffres observés doivent être les mêmes qu'auparavant.

Dans le petit ballon A, soigneusement rincé, on verse la substance exactement pesée et environ 0 gr. 08 de fil fin d'aluminium (1). Ensuite on fixe le petit ballon au tube *d*, on relie *d* avec *e* par un manchon en caoutchouc, et on vide le petit ballon en faisant baisser D 3-4 fois, le robinet *h* étant fermé, le robinet *f* étant également fermé du côté de *e* et le robinet *h* étant ouvert, on chasse au dehors l'air absorbé de A en B en le faisant passer par *f*, *g*, *m* et *h*. Ensuite on place D de telle manière que le niveau du mercure s'y abaisse au-dessous de celui en B. On fait alors arriver en A, en ouvrant *b*, quelques centimètres cubes de l'acide chlorhydrique qu'on avait versé en *c* (1 partie d'acide concentré et 3 parties d'eau) on chauffe A doucement pendant environ 2 minutes; on recommence encore 2 fois cette opération. L'acide carbonique est alors mis en liberté, et en même temps le fil d'aluminium dégage de l'hydrogène qui, de concert avec la dilution de l'air, a pour effet de chasser complètement l'acide carbonique de la solution. Lorsque tout l'aluminium est dissous et que le liquide s'est clarifié, on fait arriver dans la poire de l'acide en quantité telle que son niveau atteint presque celui du robinet *f*, on ferme ce robinet et on attend 10 minutes pour laisser aux différences de température le temps de s'équilibrer (2).

On place C et D de manière que le mercure monte à 100 cm^3 en C et au même niveau qu'en B, on lit le niveau de B et on fait absorber l'acide carbonique en E, en l'y faisant entrer et sortir trois fois. A cet effet, on chasse d'abord la lessive dans le manchon qui communique avec B, en plaçant le robinet *h* de manière qu'il ferme la communication avec B. Ensuite seulement on ouvre *h* du côté de B et on y envoie l'acide carbonique pour le faire absorber. Avant de faire la lecture, on laisse remonter la lessive jusqu'à *h* et on règle C et D à 100 cm^3 d'après le nouveau volume de B, C. On fait la lecture au bout de quelques minutes.

La différence des deux lectures faites avant et après l'absorption (*n*) donne le nombre de centimètres cubes d'acide carbonique, ramené à 0° C et à 760 mm. On a alors :

(1) Dégageant environ 100 cm^3 d'hydrogène.

(2) Pendant ce temps on peut enlever le tube A et le nettoyer en vue d'une nouvelle opération.

$1{,}966 \times n =$ l'acide carbonique en mgr.,
$4{,}454 \times n =$ le carbonate de calcium en mgr. ;

ou, si l'on a opéré sur p gr. de substance :

$$\frac{n}{p} \times 0{,}1966 = \text{l'acide carbonique \%.}$$

$$\frac{n}{p} \times 0{,}4454 = \text{le carbonate de calcium \%.}$$

Pour faire directement la lecture en %, on opère sur un poids de matière déterminé comme dans les dosages calcimétriques, savoir :

Pour les matières riches en CO^2 : 0 gr. 1966 ; 1 cm^3 = 1 % CO^2 ;
ou 0 gr. 2227 ; 1 cm^3 = 2 % $CaCO^3$;
Pour les matières pauvres en CO^2 : 0 gr. 3932 ; 1 cm^3 = 0,5 % CO^2 ;
ou 0 gr. 4454 ; 1 cm^3 = 1 % $CaCO^3$.

DOSAGE DE L'EAU

Le dosage direct de l'eau, qu'on peut avoir à effectuer pour le contrôle des liants hydrauliques, se fait en chauffant la matière avec de l'oxyde de plomb de la même manière que pour la combustion des matières organiques.

A 8-10 cm. de l'extrémité d'un tube de verre peu fusible, ayant 1 cm. de diamètre et 26 cm. de long, on forme par soufflage une poire d'une capacité d'environ 25 cm^3. Dans le milieu de la partie la plus longue du tube on place une couche de 3-5 cm. de long d'oxyde de plomb réduit en poudre et déshydraté qu'on maintient en place à l'aide de deux bouchons d'amiante placés de chaque côté. La matière soumise au dosage est placée dans la poire et mélangée avec 6-8 fois la même quantité d'oxyde de plomb par retournement du tube sur lui-même. Un tube à chlorure de calcium fixé à la partie la plus longue du tuyau, après lequel on en fixe un second pour plus de sûreté, sert à recueillir la vapeur d'eau.

On fait passer dans l'appareil un courant d'air sec, puis on chauffe lentement le contenu de la poire jusqu'à la fusion. Dans la suite on chauffe également l'endroit du tube où se trouve la couche d'oxyde de plomb, de manière à chasser toute l'eau condensée. Finalement on laisse refroidir dans un courant d'air et on pèse le tube à chlorure de calcium.

DOSAGE DU CARBONATE DE CHAUX ET DE LA CHAUX CAUSTIQUE

Treadwell donne la méthode suivante pour le dosage volumétrique du carbonate de chaux et de la chaux caustique, qui peut être nécessaire pour le contrôle de la chaux vive.

On prend une assez grande quantité de chaux vive que l'on casse en fragments de la grosseur d'un pois et on en prélève 14 gr. On éteint la chaux avec de l'eau ayant subi une ébullition prolongée, on la verse, en rinçant la fiole, dans un ballon de 500 cm^3, on complète à 500 cm^3 jusqu'au trait avec de l'eau bien bouillie, on agite énergiquement et on verse 50 cm^3 du liquide trouble dans un second ballon de 50 cm^3 qu'on remplit jusqu'au trait.

50 cm^3 de cette solution, préalablement bien mélangée par agitation, sont additionnés de 60 cm^3 d'acide chlorhydrique déci-normal et chauffés jusqu'à cessation de tout dégagement d'acide carbonique. On laisse ensuite refroidir, on ajoute une goutte de méthylorange, et on titre avec une lessive de soude déci-normale.

A une autre portion de 50 cm^3 de la même solution on ajoute quelques gouttes d'une solution de phtaléine de phénol et on fait le titrage avec de l'acide chlorhydrique déci-normal ajouté goutte à goutte, et en agitant constamment jusqu'à décoloration.

Les deux portions de 50 cm^3 contenaient chacune 0 gr. 14 de la chaux soumise à l'analyse. En admettant que dans le premier titrage on ait employé t cm^3 et dans le second t^1 cm^3 de solution normale, la quantité d'acide employée pour la neutralisation est :

pour $CaCO^3$ + CaO.................................. 60 — t cm^3,
pour CaO.. t' cm^3.

par conséquent la quantité employée pour $CaOCO^3$ est 60 — $(t + t^1)$ cm^3.

Les 0 gr. 14 de chaux contenus dans les 50 cm^3 ci-dessus contiennent donc :

$$t' \times 0 \text{ gr. } 002805 \text{ CaO}$$

et

$$[60 - (t + t')] \times 0 \text{ gr. } 005005 \text{ CaCO}^3,$$

ou en % :

$$t' \times 2{,}004 \% \text{ CaO}$$
$$[60 - (t + t')] \times 3{,}575 \% \text{ CaCO}^3.$$

CONTRÔLE DE LA FABRICATION DES LIANTS HYDRAULIQUES. CHAUX HYDRAULIQUE

Comme on l'a vu au premier chapitre de cet ouvrage, les chaux hydrauliques sont obtenues par la cuisson de chaux argileuse ou siliceuse. La cuisson a pour but d'expulser l'acide carbonique de la chaux, mais non de la scorifier. La chaux hydraulique ainsi obtenue contient les silicates à un état suffisamment solubilisé pour qu'ils se combinent avec elle au gâchage et forment des silicates de chaux. La grande proportion de chaux caustique contenue dans la matière calcinée fait qu'il suffit le plus souvent de l'hydrater avec un peu d'eau pour qu'elle s'effrite et se réduise en poudre.

Le durcissement de la chaux hydraulique employée aux travaux de maçonnerie est très lent, de sorte que ce n'est qu'au bout de 1-2 ans qu'on peut juger de ses qualités. Sa couleur est jaunâtre, grisâtre ou rougeâtre; les chaux hydrauliques riches en silice et pauvres en fer sont presque blanches.

Le poids spécifique est généralement inférieur à 2,9. La perte au feu (de la chaux hydratée) est généralement supérieure à 8 %.

Comme la matière première de la chaux hydraulique ne subit aucune préparation spéciale, il ne saurait être question de contrôle chimique proprement dit de la fabrication. L'essentiel est de faire en sorte d'obtenir des produits de qualité uniforme; à cet effet, on a soin de trier les pierres calcaires pour en éliminer celles qui contiennent des veines de quartz ou des pierres étrangères. Il est important de maintenir la température de cuisson dans les limites voulues, afin d'éliminer complètement l'acide carbonique sans aller jusqu'à la scorification de la matière.

Le contrôle est un peu plus compliqué lorsqu'il s'agit de la fabrication des chaux éminemment hydrauliques, sur laquelle vient se greffer la fabrication du ciment de grappiers.

CIMENT ROMAIN

La fabrication du ciment romain est sensiblement la même que celle de la chaux hydraulique, avec cette différence que le produit doit être broyé après la cuisson. Le contrôle de la fabrication consiste à prélever de temps en temps des échantillons du ciment réduit en poudre et à contrôler d'une part sa finesse, de l'autre son

invariabilité de volume. On réunit les échantillons de toute une journée pour en faire un échantillon moyen dont on contrôle la résistance à la traction et à la compression.

CIMENT PORTLAND. CONTROLE DE LA FABRICATION

Le ciment Portland est le liant hydraulique le plus précieux, mais aussi le plus difficile à fabriquer. On ne rencontre que très rarement des marnes propres à la fabrication du ciment sans autre mélange (ciment Portland naturel); le plus souvent le ciment est fabriqué avec un mélange soigneusement dosé de matières préalablement réduites en poudre fine, ainsi qu'on l'a vu plus haut.

Nous avons décrit tout au long les opérations préparatoires des matières premières et leur cuisson soit au four vertical, soit au four rotatif, et nous n'y reviendrons pas.

Le mode de calcul du mélange des matières premières est loin d'être partout le même, les différents Etats ayant prescrit des formules auxquelles doivent répondre les ciments pour être admis aux adjudications administratives. Nous avons donné ces formules au chapitre II.

Il n'y a pas lieu d'insister ici sur la justification et l'emploi de ces formules, car les unes ont été établies empiriquement par l'étude comparative de ciments de bonne qualité, tandis que les autres sont basées sur des hypothèses dont l'exactitude n'est pas établie. La raison en est que le mode de formation des ciments hydrauliques est loin d'être expliqué. Seule, la connaissance exacte des lois qui régissent la formation du ciment dans la cuisson permettra de formuler une définition exacte de ce produit et, par suite, de fixer les limites extrêmes de sa composition.

Pratiquement, la formule de Michaelis a été reconnue comme étant une des meilleures. Elle permet de resserrer la composition des matières premières dans des limites telles que pour obtenir un bon ciment, il suffit de quelques essais de cuisson pour trouver les proportions les plus favorables du mélange.

La perte au feu du ciment Portland est normalement de 2 %, mais elle peut atteindre 5 % dans certains cas sans qu'on puisse incriminer les matières qui ont servi à le fabriquer.

Le poids spécifique du ciment est plus élevé que pour les autres liants hydrauliques. Comme ce produit absorbe de l'humidité et

un peu d'acide carbonique pendant le silotage et le transport, les ciments du commerce ont généralement un poids spécifique plus faible que le clinker sortant du refroidisseur. Il y a donc lieu d'établir une distinction entre les deux produits quand il s'agit d'indiquer leur poids spécifique.

Contrôle de la fabrication. — Le contrôle de la fabrication du ciment Portland varie suivant les procédés de préparation des matières premières. Dans le procédé humide, le chimiste doit contrôler et au besoin rectifier la composition du mélange du bassin collecteur ; il doit vérifier incessamment la teneur en substance sèche de la boue de chaque bassin. Lorsque les matières premières sont pesées et mélangées à l'état d'humidité naturelle pour être ensuite soumises ensemble au broyage humide, il est indispensable de connaître leur degré d'humidité et leur composition chimique. Dans ce procédé, en effet, elles parcourent un chemin relativement long pour arriver jusqu'au bassin collecteur sur lequel on prélève les échantillons définitifs, et il est parfois difficile d'apporter au mélange de ce bassin la correction voulue parce qu'on n'a pas toujours sous la main la quantité de boue calcaire ou argileuse nécessaire pour cela. Pour la même raison, il faut toujours achever l'analyse de la boue d'un bassin avant de l'écouler dans le bassin collecteur.

On contrôle la finesse de la boue à l'aide des tamis dont il a déjà été question plus haut.

Dans le procédé sec, le chimiste devra connaître la nature et la composition exacte des matières premières, afin de pouvoir établir les proportions dans lesquelles elles doivent être mélangées pour fournir un ciment de bonne qualité. Dans les usines modernes, ce contrôle est d'ailleurs considérablement facilité par l'installation de silos à poudres brutes où s'effectue le mélange de ces dernières.

Une importance particulière s'attache au contrôle de la finesse de mouture, dont dépendent la régularité et l'uniformité de cuisson du ciment ; les gros grains restent inertes et ne prennent aucune part à la réaction. Pour des raisons d'économie, on se contente généralement d'une finesse correspondant à un refus de 1 à 2 % sur le tamis à 900 mailles, et de 15 à 20 % au tamis à 5.000 mailles. Un moyen très simple de s'assurer que les poudres brutes ont été réduites à la finesse voule, consiste à examiner les sur-

face des clinkers concassés au marteau : ces surfaces doivent présenter une coloration foncée très uniforme ; la présence de points blancs, visibles à l'œil nu, dénote une insuffisance de broyage des matières premières.

C'est le procédé demi-humide qui exige le plus de soins de la part du chimiste, car il est beaucoup plus difficile d'opérer le mélange intime d'une matière sèche avec une matière humide que le mélange de deux farines ou de deux boues ; en outre, dans le procédé demi-humide, la matière est réduite en briques à sa sortie du mélangeur, ce qui rend impossible toute correction après coup.

La composition du calcaire doit être contrôlée en temps utile, c'est-à-dire sur échantillons prélevés au silo à poudre calcaire et avant le mélange de celle-ci avec l'argile ; ce contrôle présente surtout de l'importance lorsque la matière est riche en silicates et que sa composition manque d'uniformité. Enfin, on soumet le mélange à un dernier contrôle sur des échantillons qu'on prélève à la presse à briques : en examinant un morceau de brique brute, on ne doit remarquer à la cassure ni grumeaux, ni grains de calcaire.

CIMENT DE LAITIER. ANALYSE DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU

Par la méthode rapide de M. E. Bazin (1)

Pour arriver à donner au ciment de laitier la régularité de composition, de temps de prise et de résistance que l'on demande habituellement à ce produit, il faut connaître par avance la composition chimique du laitier mis en œuvre ainsi que celle de la chaux hydraulique employée, de façon à déterminer exactement les proportions dans lesquelles on devra les mélanger l'un à l'autre. Pour cela, il faut donc que le chimiste attaché à l'établissement soit en mesure d'appliquer des méthodes d'analyses qui, malgré leur rapidité, n'en soient pas moins exactes. La méthode d'analyse employée par l'auteur depuis des années, permet de faire l'analyse complète d'un laitier en quelques heures, et comme aucun dosage d'élément ne se fait par différence, on se rendra compte ainsi de son exactitude presque rigoureuse.

L'analyse chimique des laitiers comprend les essais suivants :

(1) E. Bazin. *Rev. des matér. de construction*, 1910, p. 175.

Silice ;
Alumine ;
Manganèse de fer ;
Chaux ;
Magnésie ;
Acide sulfurique ;

Dosage de la silice. — *a*) On pèse 5 grammes de laitier bien desséché et pulvérisé, on les met dans une capsule à fond plat de 500 cm³ de capacité et on attaque par 50 cm³ d'acide chlorhydrique concentré.

On évapore à sec au bain-marie. On reprend par 30 cm³ d'acide chlorhydrique et 100 cm³ d'eau bouillante. On filtre sur papier de 9 cm. de diamètre dans un ballon jaugé de 500 cm³ (liqueur filtrée *a*). Laver à l'eau bouillant acidulée par l'acide chlorhydrique, puis à l'eau bouillante seule.

b) Comme le laitier renferme une grande quantité de silice (30 à 35 %), il est préférable de faire un dosage spécial de cette substance en opérant sur un gramme. Pour cela, on pèse un gramme de laitier et on le met dans une capsule en porcelaine de 85 mm. de diamètre. Délayer avec un peu d'eau et attaquer par 15 cm³ d'acide chlorhydrique concentré. Evaporer à sec au bain-marie. Reprendre après refroidissement par 5 cm³ d'acide chlorhydrique concentré et un peu d'eau bouillante.

On filtre sur papier de 9 cm. de diamètre, puis on lave à l'eau bouillante acidulée par l'acide chlorhydrique, puis à l'eau bouillante seule. On sèche le précipité, puis on le calcine. Le poids trouvé multiplié par 100 donne la silice % dans le laitier.

Traitement de la liqueur filtrée. — On laisse refroidir et on complète le volume à 500 cm³ dont on prélève :

100 cm³ = 1 gramme = dosage de l'alumine.
100 cm³ = 1 gramme = dosage du fer.
50 cm³ = 1/2 gramme = dosage de la chaux et de la magnésie.
100 cm³ = 1 gramme = dosage du manganèse.

Dosage de l'alumine. — On neutralise exactement par l'ammoniaque ajoutée goutte à goutte, puis on étend à 500 cm³ avec de l'eau froide. On acidule ensuite par 4 cm. d'acide chlorhydrique fort et on ajoute 20 cm³ d'une solution de phosphate de soude à 100 gr. par litre. Agiter. Ajouter ensuite 50 cm³ d'une solution d'hyposulfite de soude à 200 gr. par litre, puis 15 cm³ d'acide acétique cristallisable, et chauffer rapidement pour atteindre l'ébullition, que l'on maintient pendant 15 minutes.

Filtrer aussi rapidement que possible sur un filtre exempt de

cendres, laver parfaitement avec de l'eau chaude. Sécher, calciner dans un creuset de porcelaine et peser le phosphate d'alumine.

$$AlTPO^4 \times 0{,}41847 \times 100 = Al^2O^3\ \%$$

En suivant strictement les indications ci-dessus, on obtient un phosphate d'alumine bien blanc.

Dosage du fer. — On ajoute 10 cm³ d'acide chlorhydrique au flacon d'Erlenmayer contenant la prise d'essai de 100 cm³ = 1 gr. On ajoute ensuite 150 cm³ d'eau et on chauffe jusqu'à commencement d'ébullition. On retire du feu et on ajoute goutte à goutte, en agitant continuellement, une solution acide de protochlorure d'étain obtenu de la façon suivante : on fait dissoudre 20 gr. de chlorure stanneux dans un litre d'eau chaude, puis, après dissolution, on ajoute 10 cm³ d'acide chlorhydrique concentré contenu dans une burette.

On ajoute donc goutte à goutte la précédente solution, et ce jusqu'à décoloration complète. La réaction est la suivante :

$$Fe^2Cl^6 + SnCl^2 = 2\,FeCl^2 + SnCl^4$$

Cette partie de l'opération est très délicate et demande beaucoup d'attention. On agite ensuite fortement, puis on refroidit rapidement sous un jet d'eau fraîche et on ajoute 30 cm³ d'une solution de bichlorure de mercure à 5 gr. par litre. Il doit se produire un très léger trouble.

$$SnCl^2 + 2\,HgCl^2 = Hg^2Cl^2 + SnCl^4$$

Si ce trouble ne se produit pas, c'est qu'on a employé trop peu de la solution de chlorure stanneux ; si au contraire il se produit un véritable précipité blanc, on en aurait trop mis. Dans les deux cas, l'opération est à recommencer. Supposons qu'elle ait réussi. Nous ajoutons alors 60 cm³ d'une solution composée de la façon suivante : on fait dissoudre 200 gr. de sulfate de manganèse dans 400 cm³ d'eau bouillante ; après dissolution et filtration si nécessaire, on ajoute 200 cm³ d'eau, 400 cm³ d'acide sulfurique à 1/1 et 200 cm³ d'acide phosphorique sirupeux (D^{15} = 1,70) — puis environ trois quarts de litre d'eau froide, enfin on titre au permanganate de potassium jusqu'à coloration rose.

Si x représente le nombre de centimètres cubes de permanganate employés et T le titre du permanganate au fer, le % de protoxyde de fer sera donné par la formule :

$$x \times T \times 100 \times 1{,}285 = FeO\ \%.$$

Dosage de la chaux. — Après avoir peroxydé le fer à l'ébullition par quelques gouttes d'acide azotique, on ajoute du brome et un excès d'ammoniaque dans le flacon d'Erlenmayer contenant la prise d'essai. On précipite ainsi $Al^2O^3 + Fe^2O^3 + Mn^3O^4 + P^2O^5$ et on filtre. Conserver le filtrat. Dissoudre le précipité au moyen d'acide chlorhydrique étendu et chaud et précipiter de nouveau par l'ammoniaque et le brome. Répéter trois à quatre fois la précipitation. On filtre en ajoutant la liqueur filtrée à la précédente. Aciduler la liqueur par l'acide acétique, faire bouillir et précipiter la chaux par 20 cm^3 d'une solution saturée d'oxalate d'ammoniaque. Laisser reposer 2 heures, filtrer et laver à l'eau bouillante (prendre du papier à filtrer ordinaire pour cette filtration). Mettre le filtrat de côté pour le dosage de la magnésie. Jeter le filtre et son contenu dans un flacon d'Erlenmayer de 1 litre, ajouter 30 cm^3 d'eau et 20 cm^3 d'acide sulfurique à 1/1. Déchirer le filtre à l'aide d'un agitateur pour faciliter la dissolution du précipité. Ajouter ensuite un demi-litre d'eau chaude pour avoir une température d'environ 70° C. Titrer ensuite au permanganate jusqu'à coloration rose persistante.

Si x représente le nombre de centimètres cubes de permanganate employés et T le titre du permanganate pour fer, on obtiendra le % de chaux au moyen de la formule suivante :

$$x \times \frac{T}{2} \times 100 = \text{CaO } \%.$$

Dosage de la magnésie. — Dans le filtrat on dose la magnésie. Pour cela, on ajoute quelques gouttes d'ammoniaque pour rendre la liqueur alcaline, puis 25 cm^3 d'une solution de phosphate de soude à 100 gr. par litre, le tout à froid. Agiter fortement le liquide et laisser reposer. Filtrer sur papier de 7 cm de diamètre. Laver le verre et le précipité à l'eau ammoniacale (100 cm^3 d'ammoniaque pour un litre d'eau), puis sécher le filtre et son contenu à l'étuve ; incinérer, puis calciner le précipité jusqu'à ce qu'il soit bien blanc.

$$\text{Poids du précipité} \times 100 \times 0{,}3624 = \text{MgO } \%.$$

Dosage du soufre. — Attaquer un gramme par l'acide azotique fort (en attaquant par l'acide azotique à 1/1, on observe un dégagement d'hydrogène sulfuré noircissant le papier d'acétate de plomb et par suite une perte de soufre). Evaporer à sec, reprendre

par 20 cm³ d'acide chlorhydrique à 1/1, faire 100 cm³ et filtrer. Neutraliser complètement la liqueur filtrée par l'ammoniaque et redissoudre le précipité formé par le moins d'acide chlorhydrique possible, de façon que la solution soit *très légèrement acide*. Précipiter ensuite par le chlorure de baryum à 10 %.

La précipitation doit se faire dans le liquide bouillant, le réactif lui-même doit être bouillant, et ce n'est que dans ces conditions qu'on obtient un précipité de sulfate grenu, se déposant rapidement et d'un lavage facile.

Le sulfate de baryte retenant énergiquement une quantité de sels en présence desquels il est précipité, on doit apporter à son lavage des soins particuliers. Le lavage se fera d'abord par décantation à trois ou quatre reprises au moyen de l'eau bouillante; on jettera ensuite le précipité sur le filtre et on continuera à laver à l'eau bouillante jusqu'à ce que les eaux de lavage ne renferment plus trace de chlorure.

Le sulfate barytique bien lavé se présente, après calcination, sous forme d'une poudre blanche; si le lavage est incomplet, il forme une masse cohérente. On détermine la quantité de soufre % de la façon suivante :

$$BaSO^4 \times 100 \times 0{,}13755 = S\ \%$$

EMPLOI DE L'EAU SUCRÉE DANS L'ÉTUDE DES CIMENTS ET DES SILICATES (1)

La dissolution de CaO ou de Ca $(OH)^2$ dans l'eau sucrée à 10 % est complète en un quart d'heure; elle atteint 1 gr. 8 de CaO environ par 100 cm³, à la température ordinaire. La solubilité de Ca CO^3 dans les mêmes conditions n'est que de 0 gr. 0036 d'après Jacobsthal, de 0 gr. 006 d'après Battut, de 0 gr. 0035 d'après Bressler. L'auteur a trouvé 0 gr. 0047 en opérant sur 1 gr. pendant une demi-heure, avec agitation continuelle du vase et filtration suivie de deux lavages à l'eau. En opérant par lavage prolongé à l'eau sucrée de $CaCO^3$ sur le filtre, la dissolution est proportionnelle au temps : elle est en moyenne de 0 gr. 00126 à l'heure, c'est-à-dire qu'elle va bien plus lentement que lorsqu'on

(1) WLADIMIR JUPEREFF, *Tonind. Ztg.*, 1908, p. 280. — Cf. *Rev. des matér. de constr.* 1908.

opère par agitation. En raison de cette faible solubilité de $CaCO^3$, l'eau sucrée à 10 % convient très bien pour la séparation de $CaCO^3$ et de CaO dans les mélanges qui ne contiennent pas d'autres éléments.

La solubilité des silicates de chaux hydratés dépend surtout de la durée de l'opération. D'après Lippmann, 100 cm³ d'eau sucrée à 10 % et à 30 % dissolvent à 17° respectivement 0 gr. 0135 et 0 gr. 1570 de silicate de chaux précipité et séché à l'air ; 100 cm³ d'eau sucrée à 10 % dissolvent à 100° 0 gr. 0268 de silice précipitée ou 0 gr. 0188 de silice calcinée. D'après l'auteur, 100 cm³ d'eau sucrée à 1 % dissolvent 0 gr. 045 de SiO^2 dans le silicate de chaux précipité et séché à 100° (contenant des quantités minimes de Cl, Na, Fe). En raison de cette solubilité élevée, l'eau sucrée ne peut être employée dans le cas de la silice hydratée et des silicates de chaux hydratés.

L'aluminate de chaux obtenu par précipitation de l'aluminate de soude par $CaCl^2$ cède à 100 cm³ d'eau sucrée 0 gr. 0304 de Al^2O^3 en moyenne, c'est-à-dire que l'alumine se comporte à peu près comme la silice. Andrlik, Pellet et Leduc sont arrivés à des conclusions analogues pour les silicates et les aluminates : la chaux combinée se dissout, par digestion dans l'eau sucrée, en proportions variables avec la concentration, le rapport des poids en présence, la température, la durée, et la présence de plus ou moins grandes quantités d'oxyde de fer ou d'alumine.

D'après Michaëlis, la solubilité des aluminates est de 0 gr. 25 par litre pour l'eau sucrée à 8 et 20 %.

En traitant par 200 cm³ d'eau sucrée à 10 % 1 gr. de silicates ou d'aluminates de chaux préparés par fusion, l'auteur a obtenu les résultats moyens suivants (quantités de CaO perdues), qui mettent en évidence l'influence du temps :

Nombre de jours	$Al^2O^3.CaO$	$Al^2O^3.2CaO$	$Al^2O^3.3CaO$	$SiO^2.CaO$	$SiO^2.2CaO$	$SiO^2.3CaO$
1..........	4,50	18,00	32,50	0,80	3 60	12,60
3..........	6,40	20,30	31,20	1,20	4,00	14.80
4..........	8,70	27,00	40,60	1,20	4,00	16,00
9..........	10,70	33,80	47,00	»	»	»

SUR L'EMPLOI DE LA PHÉNOLPHTALÉINE POUR DÉCELER LA PRÉSENCE DE LA CHAUX LIBRE DANS LE CIMENT PORTLAND (1)

Il est possible de déceler la présence de chaux libre, anhydre ou hydratée, dans un ciment ou un mortier de ciment à l'aide de la coloration rose qu'elle communique, même en très petite quantité, à une solution aqueuse de phénolphtaléine. A. Baikoff a fait diverses expériences à ce sujet au laboratoire mécanique de l'Institut des Ingénieurs des ponts et chaussées de Saint-Pétersbourg. On sait en effet quel est le danger de la présence d'un peu de chaux libre dans le ciment si l'on ne prend pas la précaution de l'éteindre en arrosant d'eau les roches encore chaudes ou en laissant siloter un certain temps le produit après mouture. Quoi qu'il en soit, l'hydrate de chaux est un constituant essentiel de tous les produits hydrauliques soit qu'il existe à l'état de chaux éteinte (chaux hydraulique en poudre, ciment de laitier et de pouzzolane), soit qu'il n'y apparaisse qu'après le gâchage (ciment Portland, ciment romain). La chaux, outre l'état anhydre et l'état d'hydrate, peut encore être combinée aux autres oxydes soit à l'état de combinaison chimique cristalline définie, soit à l'état de masse homogène amorphe de composition non définie. Dans les ciments de laitier et de pouzzolane il reste toujours également, après le gâchage, un excès d'hydrate de chaux non combiné, de sorte que ce dernier se rencontre dans tous les produits hydrauliques après le gâchage à l'eau.

L'acide carbonique de l'air et des eaux naturelles a pour effet de carbonater cet hydrate, et cette réation a une grande importance pour les constructions sous l'eau, dont la résistance et la durée sont limitées par la formation de ce carbonate de chaux. Mais cette carbonatation est très lente, grâce à la faible teneur en acide carbonique de l'air et des eaux naturelles, et à la lenteur de la diffusion de l'eau à l'intérieur des matériaux en ciment, notamment en mortier gras. La carbonatation progresse donc de la surface vers le centre, avec formation d'une croûte superficielle protectrice. Cette formation est très lente, car on peut se rendre compte par un calcul simple que la carbonatation de la chaux éteinte d'un volume donné de pâte pure de ciment exige un mil-

(1) A. Baikof. — *Tonind. Zeitung*, XXVIII, n° 149, p. 1713 à 1715, et n° 152, p. 1747 1749. — Cf. *Rev. des matér. de construction.*

lion de volumes d'air ; en outre, dans l'eau l'intérieur de la masse se trouve traversée par l'eau avant qu'il se soit formé une couche importante de carbonate de chaux.

On peut se rendre très facilement compte avec la phénolphtaléine de la formation de cette couche, en mouillant la cassure fraîche de l'éprouvette avec une solution alcoolique de phénolphtaléine, que la chaux colore en rose, et qui est indifférente au carbonate de chaux. On peut ainsi déceler une croûte de carbonate de chaux de moins de 0 mm. 1 d'épaisseur, l'éprouvette restant complètement blanche dans le réactif tandis que sa cassure se colore entièrement en rouge. On observe toujours sur la cassure fraîche des briquettes un noyau rose entouré d'un liséré incolore dont l'épaisseur dépend des conditions de confection et de conservation des éprouvettes. Il résulte aussi des expériences faites que la carbonatation de l'hydrate de chaux est très lente, car les éprouvettes restées un an à l'eau, puis quelques mois à l'air, ont montré une croûte de quelques millimètres lorsqu'elles étaient faites en mortier 1 : 3, et de 0 mm. 2 seulement en pâte pure.

Ainsi que le montre le tableau ci-dessous, ce n'est que dans deux essais (n°s 9 et 10) que la phénolphtaléine n'a pas décelé la présence de chaux libre, les conditions les plus favorables pour une forte fixation d'acide carbonique se trouvaient là réunies.

Les recherches entreprises par l'auteur pour étudier à l'aide de la phénolphtaléine la nature des ciments avant gâchage n'en sont encore qu'à leurs débuts ; les premiers résultats sont les suivants :

Si l'on ajoute à une solution alcoolique de phénolphtaléine des quantités d'eau différentes, il doit être possible de trouver là un moyen de déterminer dans les ciments la chaux anhydre, l'hydrate de chaux et peut-être la chaux combinée, étant donné en effet que la chaux anhydre et la chaux hydratée se comportent de façons différentes par rapport à l'alcool anhydre et à l'alcool hydraté. La chaux anhydre peut déshydrater l'alcool en s'hydratant elle-même, ce qui permet de préparer de l'alcool anhydre à 100 %. La chaux hydratée, au contraire, se dissout dans l'alcool et, lorsqu'on y ajoute de la phénolphtaléine, la solution se colore en rouge. On peut donc établir aisément la présence d'une quantité minime de chaux anhydre à l'aide de la coloration rose qu'elle prend quand on y ajoute une solution alcoolique de phénolphta-

léine contenant quelques centièmes d'eau. Dans une telle solution les silicates et les aluminates se comportent d'une façon différente, car ils réagissent beaucoup plus faiblement sur l'eau ajoutée à l'alcool; mais, si l'on se sert d'alcools de concentrations diverses, on entrevoit la possibilité d'établir la présence de ces corps. C'est ce que confirment les faits suivants.

On a traité par une solution alcoolique de phénolphtaléine un ciment de laitier, un ciment romain et un ciment Portland, tous trois de composition et de propriétés bien connues. Avec le ciment de laitier, la liqueur s'est instantanément colorée en rouge intense ; avec le ciment romain, la liqueur, d'abord incolore, s'est colorée au bout de peu de temps avec une intensité croissante ; enfin, avec le ciment Portland on n'a obtenu aucune coloration. On observa les mêmes phénomènes sur les ciments avant durcissement; mais, en les arrosant d'eau avant de les traiter par la phénolphtaléine, on constata dans les trois cas une coloration rouge intense. Il résulte clairement de ces expériences que la chaux existe dans les trois ciments sous des formes différentes.

On sait que la chaux est ajoutée à l'état d'hydrate dans le ciment de laitier ; d'autre part, il est très vraisemblable qu'elle se trouve dans le ciment Portland sous forme de silicate tricalcique ; elle doit donc se présenter dans le ciment romain sous une troisième forme, qui est probablement l'aluminate de chaux.

On vient de voir qu'une solution alcoolique de phénolphtaléine reste incolore en présence de ciment Portland, ce dernier ne contenant pas de chaux libre ; mais le fait suivant est à noter.

Lorsqu'on ajoute de la chaux éteinte dans une solution alcoolique de phénolphtaléine, et que l'on filtre ensuite, la solution alcoolique qui se trouve au-dessus de la chaux non dissoute est colorée en rouge, et cette coloration disparaît aussitôt qu'on ajoute à la liqueur du ciment Portland. La phénolphtaléine n'est d'ailleurs pas détruite par le ciment en poudre, car la coloration rouge reparaît d'une manière bien intense par l'addition de chaux éteinte. On doit en conclure que le ciment Portland anhydre peut absorber la chaux hydratée.

Or, on sait qu'en présence de l'eau le ciment donne lieu à la séparation d'une quantité considérable d'hydrate de chaux et se comporte comme une matière basique ; on voit qu'au contraire, en l'absence de l'eau, il peut encore fixer une certaine quantité

de chaux et par suite se comporter comme un acide. On peut chercher la raison de ce phénomène, paradoxal au premier abord, dans ce que le ciment Portland pourrait être considéré comme un mélange de deux corps : un silicate basique et une pouzzolane. Cette pouzzolane est une sorte de laitier facilement fusible qui se forme à l'état fondu à la température de cuisson du ciment (1500°), et duquel se sépare par cristallisation, comme d'une dissolution, un silicate basique formant le constituant principal du ciment Portland cuit. Le silicate, dont la composition correspond vraisemblablement à la formule SiO^2 3CaO, a un point de fusion supérieur à 1700° et, par suite, il ne peut se former dans le four à ciment sans addition d'un fondant.

Telle est la raison d'être de la présence, à côté de la silice et de la chaux, de l'alumine, de l'oxyde de fer et des alcalis, le tout formant ensemble un laitier vitreux facilement fusible duquel se sépare par cristallisation un silicate basique; la solubilité de ce dernier est, dans les mêmes conditions, moindre que celle de la chaux. On peut reconnaître par là que ce laitier, étant formé en présence de la chaux en excès, doit être fortement basique, et il rappelle extraordinairement le laitier de haut fourneau, que ses propriétés pouzzolaniques rendent propre à la fabrication du ciment de laitier. Les résultats de l'examen microscopique des roches de ciment Portland correspondent complètement à cette conclusion, et l'on peut espérer que l'emploi de la phénolphtaléine apportera d'autres preuves décisives des assertions qui précèdent.

L'auteur a eu encore à examiner un échantillon de ciment Portland qui ne satisfaisait pas à l'essai normal à chaud. Traité par une solution alcoolique de phénolphtaléine, il se colora fortement, ce qui est une preuve de la présence de chaux anhydre, car le ciment Portland normal non seulement ne colore pas la phénolphtaléine, mais encore la décolore après coloration par addition de chaux. Cette recherche qualitative de la chaux libre peut aisément devenir quantitative : il suffit de traiter le ciment par une solution alcoolique de phénolphtaléine en quantité suffisante pour extraire toute la chaux, puis de titrer la chaux dans la liqueur filtrée. L'auteur compte mettre cette méthode au point par des recherches ultérieures.

Projet de méthode élaboré par le laboratoire de l'Union des fabricants allemands de ciment Portland (1).

I. ÉCHANTILLONNAGE ET CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS

Sur la quantité totale du ciment à analyser, préalablement bien mélangée, on prélève un échantillon moyen qu'on fait passer par un tamis à 600 mailles. Pour l'analyse on prend au moins 100 gr. de cet échantillon et on les introduit dans un flacon sec d'environ 150 cm³ que l'on conserve soigneusement bouché.

II. CONCENTRATION DES SOLUTIONS ET RÉACTIFS

Acide chlorhydrique (densité 1,19) : a) concentré.
b) 1 : 1
Acide azotique (densité 1,40) : concentré.
Aicde sulfurique (densité 1,85) 1 : 5 (en poids).
Ammoniaque (densité 0,925) : a) concentrée.
b) 1 : 2.
Eau de brome saturée à froid.
Solution de carbonate de sodium : 5 %.
» d'oxalate d'ammonium : concentrée.
» de phosphate de sodium (PO^4Na^2H) : 5 %.
» de chlorure de baryum : 5 %.

Solution de permanganate de potassium : 2 gr. 38 MnO^4K par litre. On effectue le titrage au moyen de sulfate double de fer et d'ammonium chimiquement pur [$FeSO^4 (NH^4)^2SO^4 + 6H^2O$] ; 1 gr. 4 de ce sel correspondant à 0 gr. 2 de fer Fe. Pour chaque titrage on prépare une solution fraîche de ce sel en en faisant dissoudre 1 gr. 4 dans 50 cm³ d'eau bouillie.

III. PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON POUR L'ANALYSE

Sur l'échantillon de 100 gr. (I) on prélève 10 gr. qu'on pulvérise finement dans un mortier d'agate. Pour les différents dosages on prend les quantités suivantes de cet échantillon pulvérisé :

1° Pour la perte au feu................	2 gr. environ de ciment
2° Pour le dosage de la silice + insolubles	1 gr. » »
Pour le dosage des sesquioxydes......	1 gr. » »
» » de la chaux..........	1 gr. » »
» » de la magnésie........	1 gr. » »

(1) Cf. *Rev. des matér. de constr.*, mai 1911.

3° Pour le dosage des insolubles, du fer et de l'acide sulfurique.............	2 gr.	»	»
4° Pour le dosage des sulfures..........	2 gr.	»	»
5° Pour le dosage des alcalis...........	2 gr.	»	»

IV. LES DIFFÉRENTS DOSAGES DE L'ANALYSE

1° Perte au feu

Dans un creuset de platine muni de son couvercle, on chauffe 2 gr. de ciment, d'abord pendant 2-3 minutes sur une petite flamme, ensuite pendant 10 minutes sur la flamme entière d'un bec Bunsen (rouge clair).

2° Silice + insolubles, sesquioxydes, chaux, magnésie

a) *Silice + insolubles.* — Dans une capsule de porcelaine de 300 cm³, on délaye 1 gr. de ciment dans 25 cm³ d'eau, puis on ajoute à froid en agitant constamment 25 cm³ d'acide chlorhydrique 1 : 1; on ajoute 25 cm³ d'eau et on évapore jusqu'à siccité sur le bain-marie.

Après refroidissement, on reprend le résidu avec 25 cm³ d'acide chlorhydrique 1 : 1 et on laisse reposer pendant au moins six heures avant de filtrer. On étend alors à environ 100 cm³, on chauffe sur le bain-marie et on sépare le résidu par filtration. Eau de lavage : eau bouillante additionnée d'un peu d'acide chlorhydrique, puis eau bouillante jusqu'à disparition de la réaction du chlore.

Résidu : majeure partie de la silice + insolubles (A).

Le filtrat séparé de A est évaporé de nouveau à sec, le résidu est repris comme précédemment avec de l'acide chlorhydrique et séparé par filtration. Résidu : Silice (B).

On effectue l'incinération en chauffant d'abord au rouge (B), puis A dans un creuset de platine incliné et fermé complètement au moyen de son couvercle, afin que les gaz ne puissent pas entraîner de silice.

Lorsqu'en augmentant la flamme on est arrivé à la combustion complète, on ouvre le creuset à moitié et on le calcine sur un bec Bunsen ouvert en grand, jusqu'à ce que le charbon soit brûlé et que la silice soit devenue blanche. Finalement on calcine au chalumeau pendant 5 à 10 minutes.

Résultat : Insolubles + Silice.

b) *Sesquioxydes.* — On concentre, jusqu'à 200 cm^3 au besoin, le filtrat chlorhydrique séparé de la silice, puis on le précipite à chaud dans une capsule de porcelaine en ajoutant goutte à goutte le moins possible d'ammoniaque concentrée; on fait bouillir légèrement pendant $\frac{1}{2}$ minute, et on filtre à chaud aussitôt. On fait le lavage avec de l'eau bouillante additionnée de quelques gouttes d'ammoniaque par litre. Après environ six lavages, on fait retomber le précipité de sesquioxydes dans la capsule de porcelaine, on le fait dissoudre dans un peu d'acide chlorhydrique, on étend à environ 200 cm^3 avec de l'eau et on précipite les sesquioxydes par l'ammoniaque comme il a été indiqué plus haut. Ensuite on lave les sesquioxydes jusqu'à disparition de la réaction du chlore.

On introduit le filtre et le précipité humide dans un creuset de platine taré, on fait sécher, on carbonise et on incinère sur une petite flamme, puis on calcine plus fortement en laissant entrer de l'air dans le creuset.

Résultat : R^2O^3.

c) *Chaux.* — On concentre à 200 cm^3 les filtrats provenant de la séparation des sesquixoydes, on acidifie légèrement avec de l'acide chlorhydrique, on porte à environ 90° C. et on ajoute 50 cm^3 de solution concentrée d'oxalate d'ammoniaque. On rend alors la solution fortement ammoniacale et on remue le précipité qui se forme en chauffant sur une petite flamme jusqu'à ce qu'il se dépose en flocons et que le liquide devienne complètement limpide. Au bout de 12 heures on filtre et on lave avec de l'eau chaude additionnée d'oxalate d'ammoniaque. Le lavage est terminé lorsque 2-3 gouttes du liquide filtrant, évaporées sur la lame de platine, ne laissent plus de résidu visible. On place dans un creuset de platine le filtre et le précipité humides, on fait sécher sur une petite flamme en inclinant le creuset, puis on incinère, on calcine sur un bec Bunsen ouvert en grand, ensuite au chalumeau pendant 15 minutes. Il est toujours nécessaire de calciner deux fois pour contrôler la constance de poids.

Résultat : CaO.

d) *Magnésie.* — On concentre à 200 cm^3 le filtrat provenant de la séparation de la chaux; on y ajoute à froid 10 cm^3 de solution de phosphate de soude et, au bout d'un instant, un tiers de son volume d'ammoniaque concentrée. Après avoir laissé reposer pen-

dant 24 heures dans un becherglass couvert, on filtre le précipité.

Eau de lavage : Eau ammoniacale froide 1 : 2 additionnée du tiers de son volume d'alcool absolu. Le précipité est séché sur le filtre à 90° environ, séparé aussi complètement que possible de celui-ci et introduit dans un creuset de porcelaine taré. Le filtre est incinéré à part et ses cendres sont ajoutées également dans le creuset de porcelaine. Le contenu du creuset est chauffé d'abord avec précaution, puis plus fortement jusqu'à ce qu'il s'enflamme. On laisse refroidir, on humecte avec dix gouttes d'acide azotique concentré, chimiquement pur, puis on chasse l'excès d'acide au bain-marie.

On chauffe avec beaucoup de précaution le précipité ainsi préparé pour éviter une projection de la masse, en se servant d'une petite flamme que l'on déplace sous le creuset jusqu'à disparition des vapeurs rousses ; on calcine alors sur un bec Bunsen, puis un instant au moyen du chalumeau, jusqu'à ce que le précipité soit devenu d'un blanc pur.

Résultat : $P^2O^7Mg^2$

3° *Résidu insoluble, fer, acide sulfurique.*

On délaie 2 gr. de ciment dans 150 cm³ d'eau en opérant dans un becherglas de forme haute (400 cm³), on ajoute à froid 25 cm³ d'acide chlorhydrique 1 : 1 en remuant constamment, on chauffe rapidement un instant jusqu'à ce que la solution soit devenue jaune et limpide, puis on filtre immédiatement et on lave à l'eau chaude (filtrat A).

On doit chauffer, puis filtrer aussitôt après la décomposition du ciment pour éviter une séparation de silice soluble.

On lave le résidu avec une solution bouillante de Na^2CO^3 à 5 % pour faire redissoudre la silice qu'il peut retenir (filtrat B).

Pour éliminer l'alcali, on lave d'abord avec de l'eau chlorhydrique chaude et finalement avec de l'eau pure chaude (1). Le résidu est séché sur le filtre, calciné dans un creuset de porcelaine et pesé.

Résultat : résidu insoluble.

Le filtrat alcalin B et les eaux de lavage ne sont plus utilisés dans l'analyse.

---

(1) Il est bon de durcir préalablement le filtre avec de l'acétate d'ammonium afin d'obtenir un filtrat bien liquide.

On reçoit le filtrat acide A, y compris les premières eaux de lavage (à l'eau chaude) dans une capsule de porcelaine, on l'évapore et on sépare la silice comme il a été indiqué en IV 2 a. Cette silice n'est pas utilisée.

Le filtrat obtenu est reçu dans un ballon jaugé de 300 cm³. Après refroidissement, on remplit jusqu'au trait et on emploie 150 cm³ de ce liquide pour le dosage de l'acide sulfurique et 150 cm³ pour le dosage du fer.

b) *Acide sulfurique.* — On porte à l'ébullition les 150 cm³ de liquide destinés au dosage de l'acide sulfurique, dans un becherglas de forme haute de 400 cm³, puis on ajoute peu à peu 10 cm³ de solution bouillante de chlorure de baryum. Le becherglas est recouvert avec un verre de montre et placé deux à trois heures sur un bain de sable jusqu'à ce que le précipité de sulfate de baryum se soit complètement déposé et que le liquide soit devenu complètement limpide. Le précipité est filtré seulement après vingt-quatre heures (1).

Résultat : $BaSO^4$

c) *Fer.* — Les 150 cm³ de liquide destinés au dosage du fer sont mélangés avec de l'ammoniaque dans une capsule de porcelaine pour précipiter les sesquioxydes comme il est indiqué plus haut en IV 2 b.

On lave de trois à six fois le précipité de sesquioxydes, puis on le fait retomber dans la capsule de porcelaine ; on le fait dissoudre dans de l'acide sulfurique étendu et on réduit la solution avec un fragment de zinc amalgamé chimiquement pur en s'aidant au moyen d'un fragment de lame de platine. Lorsque la réduction est terminée (essai avec le sulfocyanure de potassium), on sépare le contenu de la capsule du zinc et du platine, on y ajoute 25 cm³ d'acide sulfurique, on étend à 250 cm³ avec de l'eau bouillie (1) et on titre avec la solution de permanganate.

4° *Soufre des sulfures.*

On délaie 2 gr. de ciment dans un becherglas de 150 cm³, avec quelques cm³ d'eau et on ajoute 70 à 80 cm³ d'eau de brome. Au

(1) L'eau employée doit être acidifiée avec de l'acide sulfurique et additionnée d'autant de gouttes de permanganate qu'il est nécessaire pour l'oxyder complètement.

bout de deux à trois heures, on acidifie peu à peu la solution en lui ajoutant chaque fois 1 à 2 cm³ d'acide chlorhydrique en agitant.

Lorsque tout le ciment est décomposé à froid, on transvase le contenu du flacon dans une capsule de porcelaine, on sépare la silice et on dose l'acide sulfurique total dans le filtrat (comme en 3 b). On calcule le soufre des sulfures d'après la différence entre cet acide sulfurique total et l'acide sulfurique proprement dit dosé précédemment.

5° *Alcalis*. (D'après Finkener-Michaëlis).

On décompose 2 gr. de ciment avec de l'acide chlorhydrique, puis on sépare, comme il a été indiqué, la silice, les sesquioxydes et la chaux.

Le filtrat résultant de la séparation de la chaux est reçu dans une grande capsule de platine (300 cm³) et évaporé à sec au bain-marie en écrasant avec précaution les sels au moyen d'une spatule de platine.

On recouvre la capsule d'un verre de montre et on chasse les sels ammoniacaux (d'abord avec une très petite flamme). On n'enlève le verre de montre que lorsqu'il ne se produit plus de décrépitation. On ajoute au résidu 0 gr. 01 d'acide oxalique cristallisé, on reprend par de l'eau chaude, on rend ammoniacal, on couvre avec un verre de montre et on chauffe deux heures au bain-marie. On concentre s'il y a lieu à 30-40 cm³ et on filtre dans une capsule de platine de 100 cm³ environ.

Le filtrat est alors concentré à 2-3 cm³ et mis à refroidir.

On fait dissoudre 2 gr. 5 de carbonate d'ammonium neutre dans 10 cm³ d'eau, on verse cette solution dans la capsule de platine en agitant constamment et on laisse reposer douze heures en couvrant bien la capsule.

On sépare alors le liquide du précipité cristallisé de carbonate de magnésium hydraté et on le lave 6 à 10 fois, avec une solution de 7 gr. 5 de carbonate d'ammonium neutre dans 30 cm³ d'eau.

On concentre alors au bain-marie le filtrat, d'abord à une température ne dépassant pas 60°, pour éviter toute projection par les bulles qui se dégagent, puis on l'évapore à sec à 100°. On chasse alors de nouveau les sels ammoniacaux en chauffant au rouge très sombre.

On reprend le résidu par l'eau chaude, on ajoute 3 à 4 gouttes d'ammoniaque pour rendre ammoniacal et on filtre dans un grand creuset de platine (au moins 50 cm³). Dans cette opération, le creuset doit être déjà placé sur le bain-marie.

On ajoute dans le creuset 3 à 4 gouttes d'acide sulfurique 1 : 1 afin que finalement les alcalis soient sûrement combinés à l'acide sulfurique.

On évapore le filtrat jusqu'à siccité en ajoutant à la fin si c'est nécessaire le couvercle de platine fermant bien et en chauffant le creuset incliné au moyen d'une petite flamme latérale; le creuset ne doit plus contenir que des sulfates acides.

Pour les transformer en sulfates neutres, on redresse le creuset et on le chauffe avec précaution sur une flamme telle que le fond soit tout juste rouge.

On jette dans le creuset, à cinq reprises, 0 gr. 01 de carbonate d'ammoniaque cristallisé que l'on fait volatiliser en replaçant aussitôt le couvercle. Dans ces conditions, les vapeurs d'acide sulfurique sont plus facilement entraînées.

Finalement, il reste dans le creuset des sulfates neutres d'un blanc pur que l'on pèse.

On vérifie ensuite s'ils se dissolvent facilement dans l'eau chaude sans laisser de résidu et si la solution est neutre. S'il en était autrement, il faudrait ajouter à nouveau 0 gr. 05 d'acide oxalique, rendre ammoniacal, laisser reposer douze heures, filtrer à nouveau dans le creuset de platine, etc., jusqu'à ce que l'on pèse finalement des sulfates neutres.

Après avoir pesé les sulfates on les fait dissoudre et on les transvase dans une capsule en porcelaine d'une capacité de 60 à 70 cm³ (graisser au préalable le bord du creuset), on ajoute 10 cm³ d'acide chlorhydrique (1 : 2) et une quantité de solution de chlorure de platine pur au moins suffisante pour précipiter la potasse en admettant que la masse ne renferme que du sulfate de potassium.

Le liquide, bien remué avec un baguette de verre, est évaporé au main-marie à 1-2 cm³. A la fin, le bain-marie ne doit bouillir que très doucement.

Sur la masse saline refroidie, on verse 40 à 50 cm³ d'un mélange d'alcool et d'éther (2 parties d'alcool absolu pour 1 partie d'éther). On couvre et on laisse reposer quelques heures sous un

becherglas, on filtre et on lave avec le mélange d'alcool et d'éther jusqu'à ce que celui-ci passe incolore.

On plie alors le filtre (3 plis), on le fait sécher avec précaution et on le carbonise dans un creuset de platine bien fermé. Après refroidissement, on remplace le couvercle par un couvercle perforé et on calcine le sel de platine dans un courant d'hydrogène de façon à le réduire complètement à l'état de mousse de platine.

On laisse refroidir dans le courant d'hydrogène et on place le filtre carbonisé sur un nouveau filtre placé dans un entonnoir dont la douille est fermée au moyen d'un fragment de tube de caoutchouc et d'un morceau de baguette de verre. On enlève alors la potasse en lavant avec de l'eau chaude, on incinère complètement le filtre carbonisé dans un creuset de porcelaine et on pèse le platine.

100 parties de platine (en poids) correspondent à 89,28 parties de K^2SO^4 (en poids).

En retranchant la quantité de sulfate de potassium ainsi calculée de la quantité totale de sulfates obtenue, on en déduit la quantité de sulfate de sodium.

100 K^2SO^4 correspondent à 54,054 K^2O.

100 Na^2SO^4 correspondent à 43,64 Na^2O.

En dosant l'acide sulfurique par le chlorure de baryum dans la solution des sulfates rendue acide par l'acide chlorhydrique, on peut en déduire la teneur en sulfate de potassium et sulfate de sodium (dosage indirect).

Si on ne dispose pas de réactifs sûrement exempts d'alcalis, on doit opérer avec des quantités de réactifs exactement pesées et mesurées, puis doser séparément les sulfates de potassium et de sodium ou la potasse et la soude dans ces quantités réunies de réactifs et les déduire.

ANNEXES

NOTES DIVERSES SUR LE CIMENT PORTLAND

ACTION DES ACIDES SUR LES CIMENTS

Les acides décomposent le ciment avec mise en liberté de silice colloïdale partiellement soluble et de sels métalliques. Cette action est d'autant plus énergique que l'acide est plus fort et le ciment dans un état de division plus grande. Il importe de remarquer cependant que l'acide sulfurique, quoique étant un acide très fort, est bien moins nuisible que les acides chlorhydrique et nitrique par exemple; ceci provient de ce que l'acide sulfurique donne avec la chaux du ciment un sulfate insoluble qui forme une couche protectrice empêchant la pénétration ultérieure de l'acide en question.

L'eau, et surtout l'eau courante chargée d'acide carbonique, détruit à la longue les ouvrages en ciment. Pour les soustraire à l'action des acides ou pour en pallier les effets dans une certaine mesure, on les recouvre d'une couche de mortier aussi gras et compact que possible. Certains enduits, surtout ceux à base de composés organiques, tel que le goudron, peuvent suivant le cas, rendre de bons services.

INFLUENCE DES ALCALIS SUR LA PRISE DU CIMENT PORTLAND (1)

On connaît déjà l'influence d'une solution de soude sur la rapidité des phénomènes chimiques et chimico-physiques qui ont lieu lors de la prise d'un ciment. Mais de nouvelles expériences ont été faites sur différents ciments et nous donnons ici un résumé des résultats auxquels elles ont conduit.

(1) Cf. *Rev. des matér. de constr.*

Ciment N° 1						
Température		3 % d'eau	%		Temps de prise en minutes	Température ambiante
du ciment	de l'eau		de solution	de soude		
18°	19°	25,9	0	0	170	19
17	19	25,9	3,99	1,38	9	19
18	18	25,0	7.40	2,72	26	19
19	17	25,9	10,71	4,03	55	19
Ciment N° 2						
17°	19°	25,9	0	0	220	19
18	19	25,9	0,39	0,11	210	»
18	18	25,9	0,79	0,28	65	»
18	18	25,9	1,99	0,69	15	»
18	19	25,9	3,99	1,38	5	19
18	19	25,9	5 66	2,05	7	»
18	19	25,9	7,40	2,72	19	»
15	15	25,9	8,42	3,12	70	»
17	17	25,9	10,71	4,03	85	»

On voit déjà par ces tableaux que la soude commence par diminuer le temps de prise dans de notables proportions ,mais qu'il y a un minimum au delà duquel la durée de la prise va en augmentant avec la proportion de soude ajoutée.

D'après cela, on pourrait croire qu'une solution à 9 ou 10 % de soude produirait une durée de prise voisine de 220 minutes, comme s'il n'y avait que de l'eau pure; ce n'est pourtant pas ce qui se produit. On constate, en effet, qu'une solution de soude à 4 % et une autre à 10 % font toutes deux tomber le temps de prise de 220 à 5 minutes. La cause de la seconde accélération correspondrait à une hydratation.

Dans les solutions diluées de soude, le degré de saturation de la liqueur de soude est trop faible pour exercer une influence apparente quelconque. La solution de soude produit un effet d'accélération, et si son action avait été complètement essayée sur le ciment n° 2, on aurait trouvé un temps de prise de 2 à 3 minutes.

La cause de l'influence accélératrice des solutions de soude et

autres réside dans une coagulation de l'acide silicique et de l'hydrate d'alumine à l'état colloïdal.

Température du ciment	Température de l'eau	% d'eau	% de solution	% de soude	Temps de prise en minutes	Température ambiante
Ciment N° 3						
18°	19°	25,9	0,	0	8	»
17	17	25,9	3,99	1,38	11	»
18	19	25,9	7,40	2,73	220	19
Ciment N° 4						
19°	18°	25,9	0	0	23	»
19	19	25,9	0,0034	0,00174	19	»
16	16	25,9	0 0196	0 01747	14	»
19	18	25,9	0,1997	0,0695	11	16
19	19	25,9	0,299	0,1049	9	»
19	18	25,9	0,399	0,1398	10	»
19	18	25,9	0,497	0,1747	14	»
16	17	25,9	0,793	0,2792	23	16
18	19	25,9	0,990	0,348	29	»
17	18	25,9	1,996	0,695	57	»
19	18	25,9	2,991	1,049	95	»
19	19	25,9	3,990	1,381	210	»

On voit que pour le ciment n° 4 les solutions faiblement concentrées ont produit une accélération de la prise, tandis que les solutions plus fortes produisent un retard considérable.

Le chlorure d'aluminium agit de la même manière que la soude: le chlorure de chaux légèrement concentré retarde la prise, mais une solution fortement concentrée l'accélère ; il en est de même pour le sulfate de chaux.

Le chlorure de sodium en solution faible est sans action ; concentré à 6 ou 7 %, il retarde la prise.

Si on ajoute à un ciment de la soude et du chlorure d'aluminium en quantités égales, la durée de la prise tombe de 415 à 87 minutes.

	Température du ciment	Température de l'eau	Eau distillée	% de solution	% de matière	Durée de la prise en minutes
Ciment n° 3	16	17	25,9	0	0	8
Bichromate de potasse	17	17	25,9	3,99	1,38	70
Ciment n° 2.........	18	17	25,9	0	0	220
Carbonate de soude.	18	18	25,9	3,99	1,38	8
Bichromate de potasse et de soude	17	17	25,9	1,99	0,695	47

On voit par cet essai que deux matières produisant un effet contraire sont entravées dans leur action lorsqu'on les mélange à un même ciment et dans des proportions analogues à celles de leurs actions propres.

ACTION DES SOLUTIONS DE SULFURE DE SODIUM, DE SULFITE DE SODIUM ET D'ACIDE SULFUREUX SUR LE CIMENT PORTLAND ET LE CIMENT DE LAITIER (1).

Les expériences de l'auteur ont porté sur deux ciments commerciaux à prise lente ayant la composition suivante :

	Ciment Portland	Ciment de Laitier
Perte au feu....................	0,82	6,01
SiO^2.........................	24,30	20,59
Fe^2O^3........................	1,29	0,88
Al^2O^3........................	3,72	13,43
MnO..........................	0,09	0,32
CaO..........................	66,41	54,15
MgO..........................	1,28	2,10
SO^3.........................	0,89	1,42
S............................	—	0,50
Alcalis (par différence).........	1,20	0,60

I. — *Influence des solutions de sulfures de sodium.* — On utilisa des éprouvettes de traction et de compression en mortier 1 : 2 et 1 : 4. Elles furent immergées pendant un, trois, six et douze mois, dans l'eau et dans des solutions contenant respectivement 6,2, 31 et 124 gr. de Na^2S, $9H^2O$ par litre. Les différences de ré-

(1) Par le Dr H. Renezeder. *Oesterr. Wochenschr. f. d. öff. Baudienst*, 1909. — Cf. *Rev. des Matér. de constr.*

sistance des éprouvettes immergées dans l'eau et de celles immergées dans les solutions de sulfure de sodium furent les suivantes, par rapport aux éprouvettes immergées dans l'eau pour les essais après immersion de douze mois :

	A. Ciment Portland		Ciment de laitier	
Mortiers riches 1 : 2	Traction o/o	Compress. o/o	Traction o/o	Compress. o/o
Solution à 0,2 p. 100..	— 14,4	— 0,3	— 20,8	— 4,1
— à 1 p. 100..	— 7,4	— 16,5	— 6,2	— 15,1
— à 4 p. 100..	— 9,6	— 35,7	— 13,4	— 20,6
Mortiers maigres 1 : 4				
Solution à 0,2 p. 100..	— 15,9	+ 2,1	— 26,0	— 0,9
— à 1 p. 100..	— 12,9	— 6,8	— 10,8	— 23,2
— à 4 p. 100..	— 15,5	— 18,6	— 23,5	— 38,6

Par conséquent, il se produit, dans les solutions concentrées une forte diminution des résistances. Des dosages effectués sur les éprouvettes ont donné en moyenne :

	Ciment Portland	Ciment de laitier
Teneur en CaS : couches extérieures....	6,28 %	5,98 %
— — — intérieures....	0,89 —	0,0 —
— $CaSO^4$: couches extérieures..	1,37 —	2,42 —
— — — intérieures....	1,21 —	2,56 —

Les galettes de ciment pur immergées résistèrent, sauf celles immergées dans les solutions les plus concentrées, et qui présentaient un léger émiettement. On effectua aussi des essais sur des éprouvettes immergées pendant un mois dans l'eau, puis dans une solution de Na^2S à 4 %. Il se produisit alors, au bout d'un an, les différences de résistances suivantes, rapportées aux résistances des mêmes mortiers immergés pendant le même temps dans l'eau :

	A. Ciment Portland Mortier 1 : 2		B. Ciment de laitier Mortier 1 : 2	
Durée du durcissement	Traction	Compress.	Traction	Compress.
Trois mois..	39,3 (— 3,2)	731 (— 0,9)	31,7 (+ 0,3)	460 (— 2,7)
Six mois....	41,7 (+ 1,6	758 (+ 1,0)	31,0 (+ 1,8)	482 (— 1,8)
Douze mois.	40,3 (— 2,8)	803 (— 4,6)	32,5 (— 7,1)	464 (— 8,7)
	Mortier 1 : 4		Mortier 1 : 4	
Trois mois..	22,8 (— 2,56)	351 (+ 5,9)	27,1 (— 1,4)	343 (— 2,6)
Six mois....	23,5 (— 2,08)	363 (+ 1,9)	27,8 (— 0,7)	378 (— 3,3)
Douze mois.	23,0 (— 6,0)	342 (— 6,0)	27,2 (— 4,2)	368 (— 8,8)

Ces essais montrent que les mortiers ayant durci dans l'eau résistent beaucoup mieux à l'action des solutions de sulfure de sodium.

II. — *Influence des solutions de sulfite de sodium.* — La présence de SO^3Na^2 dans les eaux usées des usines et la possibilité d'une action nuisible de ces eaux sur le mortier de ciment ont conduit à étudier l'action des solutions aqueuses de SO^3Na^2 sur les mortiers de ciment Portland et de ciment de laitier. Dans ce but on étudia des mortiers 1 : 2 et 1 : 4 immergés pendant un, trois, six, douze mois dans des solutions contenant respectivement 4,20 et 80 gr. Na^2SO^3, 7 H^2O par litre.

Les différences de résistance des éprouvettes immergées dans ces dernières solutions rapportées aux résistances des éprouvettes immergées dans l'eau, atteignaient les valeurs suivantes :

	A. Ciment Portland		P. Ciment de laitier	
Mortiers riches 1 : 2	Traction o/o	Compress. o/o	Traction o/o	Compress. o/o
Solution à 0,2 %...	— 2,4	— 6,2	+ 6,5	+ 6,8
— à 1 %....	— 4,5	— 0,2	+ 1,7	— 6,1
— à 4 %...	— 7,2	— 3,4	— 8,5	— 11,8
Mortiers maigres 1 : 4				
Solution à 0,2 %...	+ 1,6	+ 1,6	— 3,8	— 6,4
— à 1 %....	— 6,1	+ 4,1	— 7,0	— 25,5
— à 4 %....	— 17,1	— 8,6	— 17,5	— 25,8

L'analyse chimique des mortiers a donné les résultats suivants :

	$CaSO^3$	$CaSO^4$
Mortier de ciment Portland : couches extérieures..	5,11	3,02
— — — — intérieures..	0,0	2,20
Mortier de ciment laitier : couches extérieures....	7,91	3,10
— — — — intérieures....	0,0	2,79

Le sulfite de calcium produit suivant la réaction :

$$Ca(OH)^2 + SO^3Na^2 = SO^3Ca + 2\ NaOH$$

formait, du côté damé, un léger émiettement et donnait un dépôt essentiellement composé de sulfite et de sulfate de chaux. Des expériences comparatives, effectuées sur des mortiers préalablement immergés dans l'eau, montrèrent également qu'une telle immersion rend les mortiers beaucoup plus résistants. Des galettes de ciment pur, immergées dans les solutions les plus concentrées, ne présentaient pas d'émiettement sensible. Une exposition alternative à l'air et dans la solution de SO^3Na^2 à 4 % avait une action nuisible. Au bout de cinq mois, il se formait déjà de fines gerçures, qui s'élargissaient beaucoup ensuite.

III. — *Influence des solutions aqueuses d'acide sulfureux.* — On étudia aussi l'influence des solutions d'acide sulfureux sur les mortiers de ciment Portland et de ciment de laitier (les eaux usées des fabriques de cellulose contiennent SO^2 en solution). Dans ce but, on immergea des mortiers 1 : 2 et 1 : 4 dans des solutions qui contenaient respectivement 2,5 et 10 gr. de SO^2 par litre. Naturellement l'action des solutions acides fut tout à fait sensible.

Dans les solutions à 1 %, il se produisait, au bout de six semaines pour les mortiers maigres et de trois mois pour les mortiers riches, un émiettement; les mortiers immergés dans les solutions à $\frac{1}{2}$ % présentaient cet émiettement au bout de cinq et de sept a huit mois.

Les essais de résistance ont donné les différences suivantes, après douze mois, différences rapportées aux mortiers immergés dans l'eau :

	A. Ciment Portland		B. Ciment de laitier	
Mortiers riches 1 : 2	Traction o/o	Compress. o/o	Traction o/o	Compress. o/o
Solution à 0,2 %	— 7,2	— 9,1	— 4,2	— 11,4
— à 0,5 %	— 14,0	— 35,0	— 24,6	— 27,9
— à 1 %	— 21,8	— 58,1	— 55,3	— 44,8
Mortiers maigres 1 : 4				
Solution à 0,2 %	+ 6,1	— 7,1	— 3,2	+ 1,4
— à 0,5 %	— 5,3	— 21,4	— 46,8	— 10,4
— à 1 %	— 28,6	— 58,7	— 63,4	— 67,8

Finalement les éprouvettes se recouvraient d'une couche épaisse de cristaux composés d'aiguilles de SO^3Ca. L'analyse des couches extérieures des mortiers a donné les résultats suivants :

	$CaSO^3$	$CaSO^4$
Ciment Portland	28,07	1,27
Ciment de laitier	20,81	1,26

La décomposition se produisait suivant les équations suivantes :

$$Ca(OH)^2 + SO^3H^2 = SO^3Ca + 2\,H^2O$$

$$2\,CaOSiO^2 + 2SO^3H^2 = 2\,SO^3Ca + SiO^4H^4$$

$$2\,CaO.\,Al^2O^3 + 2\,SO^3H^2 + H^2O = 2\,SO^3Ca + Al^2(OH)^6$$

$$2\,CaO.\,Fe^2O^3 + 2\,SO^3H^2 + H^2O = 2\,SO^3Ca + Fe^2(OH)^6$$

Le SO^3Ca était dissous par l'acide sulfureux pour former Ca $(HSO^3)^2$. qui déposait à nouveau des cristaux de SO^3Ca dans les récipients. Les galettes de ciment pur résistaient pendant un an

dans les solutions les plus faibles, les solutions les plus fortes exerçaient déjà une action destructive au bout de quelques semaines.

MODIFICATIONS APPORTÉES A LA RÉSISTANCE DU CIMENT PORTLAND PAR L'ADDITION DE DIFFÉRENTES SUBSTANCES CHIMIQUES (1)

On a fait des recherches pour déterminer l'action des différents acides ou sels alcalins sur la résistance des mortiers, en employant ces matières dissoutes dans l'eau de gâchage. Les essais de résistance à la traction furent déterminés soit au bout de 7 jours, soit au bout de 28, les briquettes étant conservées dans l'eau et dans l'air saturé d'humidité.

On employa les produits suivants : l'acide oxalique, l'acide chromique, l'acide phosphoreux et leurs sels de sodium et d'ammonium ainsi que le fluorure d'ammonium, le silicate de soude, le borax et l'acide borique.

L'acide chromique, l'acide phosphorique et leurs sels furent également employés en certaines proportions, de même que le silicate de soude.

Pour déterminer le temps de prise des différents ciments, la quantité de solution ajoutée fut mesurée d'après la consistance obtenue pour la pâte et toujours la même. La quantité varia naturellement avec les solutions.

On employa les ciments suivants A, B et C, dont suit la composition :

	A	B	C
Perte au feu	1.53	2,77	3,06
SiO^2	22,34	21,18	22,36
Al^2O^3 Fe^2O^3	9,37	10,50	12,36
CaO	65,89	64,16	60,16
MgO	0,15	traces	0.34
SO^3	0,89	1,33	1,17

Les résultats des différents essais sont relatés dans les tableaux suivants :

(1) Cf. *Rev. des matér. de constr.*, d'après *The stone trades Journal*, mai 1907.

Ciment A

Solutions employées	Dans l'eau — Nombre de jours 3	7	28	Dans l'air — Nombre de jours 3	7	28	Temps de prise (en heures)	0/0 d'eau ajoutée
	Kilogrammes par centimètre carré							
Eau...	16,9	19,1	32,6	17,5	22,0	30,7	9	24
Solution saturée d'acide oxalique	14,1	17,6	30,4	13,5	18,7	34,5	15	28
Solution saturée d'oxalate d'ammoniaque	16,5	22,2	30,4	15,5	18,7	32,8	29	29
Solution saturée d'oxalate de soude	18,2	22,5	26,0	18,6	23,8	24,2	7	27
Acide chromique (3,3 0/0)	25,0	30,0	29,4	21,5	24,5	26,5	18 50	27
Chromate d'ammoniaque (3,3 0/0 en acide	22,0	26,7	32,1	24,5	29,0	32,8	15 30	24
Chromate de soude (3,3 0/0 en acide)	26,7	26,4	34,6	29,2	30,4	30,0	13 30	27
Acide phosphorique 3 0/0	10,9	23,8	36,2	11,4	24,4	30,1	37	28
Phosphate d'ammonium (3 0/0 en acide)	13 1	27,1	39,4	14,2	25,7	35,0	19 30	29
Phosphate de soude (3 0/0 en acide)	15,5	26,8	30,9	17,5	27,0	27,0	39 30	29
Fluorure d'ammonium (7,5 0/0 en sel)	6,1	18,3	28,8	5,5	19,3	29,2	50 50	27
Silicate de soude (47 gr. par litre en SiO^2)	18,7	20,1	30,6	20,6	23,5	31,7	14 40	30
Silicate de soude (70 gr. par litre en SiO^2)	15,4	23,0	29,1	20,2	24,6	26,4	20 30	30
Solution de borax saturée	6,6	22,8	29,7	6,7	25,4	35,5	28	27
Solution d'acide borique saturée	0,0	21,1	35,0	0,0	24,0	35,7	71	26
Ciment B								
Eau...	17,2	20,2	22,4	19,8	21,5	27,9	11 30	24
Solution saturée d'acide oxalique	13,6	18 3	21,6	17,2	21,8	29,5	16 30	30
Solution saturée d'oxalate d'ammoniaque	15 9	16,5	23,8	16,0	19,4	25,0	23	29
Solution saturée d'oxalate de soude	14,4	18,3	24,2	13,2	23,7	24,0	17 30	27
Acide chromique (3,3 0/0)	17,2	25,2	27,5	19,1	27,7	32,2	26 40	27
Chromate d'ammoniaque (3,3 0/0 en acide)	19,5	21,4	27,4	22,7	23,6	20,4	14 30	27
Chromate de soude 3,3 0/0 en acide)	16,5	20,0	27,2	19,9	22,2	26,7	18 20	27
Acide phosphorique 3 0/0	12,4	20,8	24,1	16,3	25,4	27.9	40 30	30
Phosphate d'ammonium (3 0/0 en acide)	18,2	23,0	25,4	18,2	22,8	32,4	48 30	30
Phosphate de soude (3 0/0 en acide)	10,8	22,7	25,8	18,2	25,1	25,0	45 30	29
Fluorure d'ammonium (7,5 0/0 en sel)	6,1	16,6	23,6	13,7	20,4	27,4	19 45	27
Silicate de soude (47 gr. par litre en SiO^2)	15,2	21,7	27,0	15,2	24,4	29,7	16 40	31
Silicate de soude (70 gr. par litre en SiO^2)	15,2	17,5	24,1	17,3	23,0	25,5	5 30	35
Solution de borax saturée	0,0	12,4	24,2	0,0	15,0	26,5	68	29
Solution d'acide borique saturée.	0,0	0,0	13,3	0,0	0,0	11,5	15	27

Ciment C

Solutions employées	Dans l'eau			Dans l'air			Temps de prise (en heures)	0/0 d'eau ajoutée
	Nombre de jours							
	3	7	28	3	7	28		
	Kilogrammes par centimètre carré							
Eau	11,7	13,0	18,8	14,5	14,7	19,1	11 30	28
Solution saturée d'acide oxalique	13,1	13 5	19,5	12,2	16,2	20,9	9	32
Solutiou saturée d'oxalate d'ammoniaque	11,2	11,2	17,0	12,9	12,6	21,2	17	30
Solution saturée d'oxalate de soude	10,9	13,8	19,5	11,9	14,6	19,9	11 30	30
Acide chromique (3,3 %	11,1	14,5	18,5	14,1	18,2	19,0	40	30
Chromate d'ammoniaque (3,3 % en acide	9 5	13,2	20,2	14,6	18,2	23,4	26 5	30
Chromate de soude (3,3 % en acide)	12,5	14,6	22,4	15,2	18,6	24,6	20	30
Acide phosphorique (3 %)	7,4	13,8	19,9	12,6	17,5	27,9	54	32
Phosphate d'ammonium (3 % en acide)	10,5	15,2	21,0	15,2	16,5	22,2	52	31
Phosphate de soude (3 % en acide)	4,0	12,6	22,0	6,3	14,4	19,2	52 30	30
Fluorure d'ammonium (7,5 % en sel)	14,0	17,2	23,4	14,5	17,0	24,3	20 30	30
Silicate de soude (47 gr. par litre en SiO^2)	9,7	11,8	19,5	12,3	12,6	22,1	5 30	33
Silicate de soude (70 gr par litre en SiO^2)	15,5	15,5	21,8	16,1	19,2	22,2	3	35
Solution de borax saturée	4,6	11,7	17,8	5,0	11,8	21,2	66	30
Solution d'acide borique saturée	0,0	0,0	16,9	0,0	0,0	21,1	57	30

En étudiant les différents chiffres concernant la résistance, et surtout dans les tableaux B et C, on voit qu'après 28 jours, il y a eu en général augmentation de la résistance pour les briquettes gâchées avec des solutions salines, examinées comparativement avec la série faite à l'eau pure. C'est surtout avec les acides chromique et phosphorique et leurs sels qu'on remarque les accroissements les plus grands à la fois après 7 jours et 28 jours.

Avec le ciment C les expériences à l'acide chromique et ses sels donnèrent des accroissements de résistance surprenants même après 3 jours, tandis que l'acide phosphorique et ses sels donnaient des effets contraires.

Avec le ciment E, le fluorure d'ammonium donna les accroissements les plus forts et les plus réguliers.

Pour le ciment A et B le contraire se produisit : au bout de 3 jours on constata une forte diminution.

Le borax et l'acide borique donnèrent des résultats plus surprenants encore. Les solutions de phosphate de soude produisirent des craquements dans certains cas et pour les ciments B et C, l'oxalate de soude produisit souvent des fissures réticulées et courbes. Mais, en général, un accroissement notable s'est produit dans la résistance.

ACTION DES MATIÈRES GRASSES SUR LE CIMENT PORTLAND (1)

Les opinions sur l'action des matières grasses sur le ciment sont très partagées, car bien souvent les socles de machines ne semblent pas souffrir des huiles qui les salissent en permanence. Le laboratoire d'essais des ciments du *Chicago Milvaukee et Saint-Pauls Railroad* a fait à ce sujet des essais sur toutes sortes d'objets en béton destinés à se trouver en contact avec l'huile, sans observer jamais de signe de destruction du ciment. C'est ainsi que le sol d'un magasin d'huiles, quoique exposé à leur action en tous ses points, n'en était imprégné que sur 1 mm. 5 d'épaisseur, et que cette couche superficielle était en très bon état. Il en a été de même là où la pénétration avait été plus forte, comme dans la fosse à piquer d'une remise à locomotives. On entreprit cependant une série d'essais de laboratoire sur des briquettes d'essais à la traction, faites les unes en pâte pure, les autres en mortier avec 3 % de sable ou de calcaire broyé, et qu'on laissa d'abord durcir quatre jours à l'air humide. On les enduisit ensuite chaque jour jusqu'à saturation d'un mélange d'huile minérale et de graisse animale désigné sous le nom d'huile Signal. Les briquettes de mortier se fissurèrent les premières, après 2 mois et demi; au bout de 6 mois on pouvait les écraser facilement dans la main. Les briquettes en pâte pure ne commencèrent à s'altérer qu'au bout de 5 mois.

D'autres essais comparatifs furent faits avec diverses huiles animales, végétales et minérales qu'on fit agir sur des briquettes après une semaine de durcissement à l'air humide, et l'on obtint les résultats consignés dans le tableau ci-dessous, les chiffres indiquant le nombre de mois au bout desquels l'huile commençait à montrer son action, et les guillemets signifiant qu'aucun effet ne s'était encore manifesté au bout de 9 mois.

(1) D'après *Engineering News*, LIII, n° 11, p. 279. Cf. *Rev. des matér. de construction.*

Ciment fait avec	Briquettes	Huiles animales		Huiles végétales		Huile minérale	Huile Sigral
		Saindoux		Huile de ricin	Huile de lin	Pétrole brut	
Calcaire et Argile	Pâte pure	3	»	»	»	»	»
	Mortier 1 : 3	»	»	»	»	»	»
	Pâte pure	2 2/3	»	»	»	»	6
	Mortier 1 : 3	»	»	»	»	»	»
Calcaire et Laitier	Pâte pure	1	3	4	»	»	1 1/4
	Mortier 1 : 3	7	4 1/4	6 1/2	»	»	4

On voit que ce sont les graisses animales qui attaquent le plus le ciment, et les trois sortes de ciments à peu près au même degré ; les briquettes en pâte pure se désagrègent avant celles de mortier; enfin le dernier ciment est plus sensible à l'action des matières grasses. Au point de vue de son action, l'huile Signal se range aussitôt après les graisses animales, en raison de la proportion qu'elle renferme de ces graisses. L'huile de pétrole et l'huile de lin sont inoffensives, mais la première pénètre dans l'éprouvette et donne lieu à une diminution de la résistance à la traction, ce qui n'a pas lieu avec la dernière, laquelle forme, au contraire, une pellicule protectrice par oxydation.

Une autre série d'essais a porté sur un ciment composé de ciment Portland et de sable, mélangés par parties égales et moulus de manière à ne plus donner de résidu sur le tamis de 3.160 mailles par cm². On en a fait des briquettes pour essais à la traction, en mortiers 1 : 0, 1 : 1, 1 : 2 et 1 : 3. Après 2 années de conservation dans l'eau, elles furent séchées à l'air chaud pendant 20 jours, puis traitées par l'huile Signal. Après 2 années d'action de l'huile, il n'y avait encore aucun indice d'attaque, sauf pour le mélange le plus maigre, qui commençait seulement à s'attaquer. Cependant une autre éprouvette, faite en pâte pure avec du ciment additionné de sable, traitée par la même huile après 28 jours de durcissement à l'eau, était détruite au bout de 8 mois. En même temps on a plongé dans l'huile un morceau du sol du magasin d'huiles dont il a été question plus haut et au bout de 10 mois il n'avait pas subi d'altération .

Il résulte de tous ces essais que :

1° La plupart des huiles pénètrent dans le béton, ce qui peut présenter un certain danger pour ce dernier ;

2° Le béton a plus de tendance à s'attaquer quand il n'est pas encore complètement pris ;

3° Le béton bien préparé et d'un dosage assez riche se comporte mieux que le béton maigre et mal préparé ;

4° Les quantités d'huile qui, dans les conditions ordinaires, viennent en contact avec le béton, ne peuvent pas l'endommager profondément;

5° Les graisses et huiles animales sont celles qui exercent l'influence la plus mauvaise, puis viennent les huiles végétales faiblement siccatives, ensuite les huiles végétales siccatives, dont l'oxydation forme une couche protectrice, et enfin les huiles minérales.

On pourrait par suite songer à recourir à l'huile de lin pour protéger le béton contre l'action des matières grasses, mais une éprouvette ainsi traitée fut ensuite détruite par l'huile Signal. On n'obtient pas de meilleurs résultats en imperméabilisant à plusieurs reprises le béton avec une solution à 5 % d'alun et 7 % de savon, pas plus qu'en le plongeant dans la parraffine chaude ou en le traitant par le verre soluble.

*
* *

Sawdon a fait sur le même sujet une série d'expériences relatées dans un rapport de R.-C. Carpentier à l'Association américaine pour l'essai des matériaux de construction en 1907 (1).

Des éprouvettes de traction en pâte pure ont été préparées en ajoutant 2 % d'huile à l'eau de gâchage, et les résistances obtenues à 1,7 et 28 jours ont été comparées à celles des éprouvettes gâchées à l'eau pure. Une autre série d'éprouvettes a été, après 8 jours d'immersion dans l'eau, conservée pendant 20 jours dans un bain d'huile. Le tableau suivant résume les résultats obtenus. Il est à noter que toutes les éprouvettes ont satisfait à l'essai d'invariabilité de volume à l'eau bouillante, qu'elles aient été mises dans l'huile au bout de 1 jour ou au bout de 8 jours.

---

(1) *Tonindustrie Zeitung*, XXXII, n° 47, p. 561, 18 août, 1908. Cf. *Rev. des matér. de Constr.*, 1908.

Eau de gâchage et addition d'huile	Durée du séjour dans l'air	Durée du séjour dans l'eau	Durée du séjour dans l'huile	Résistance moyenne à 1 jour	Résistance moyenne à 7 jours	Résistance moyenne à 28 jours	Nature du bain d'huile
23 °/₀ d'eau.......	1	27	—	30,1	48,7	52,0	—
21 °/₀ d'eau....... 2 °/₀ d'huile de lin	1	27	—	12,1	34,5	40,0	—
21 °/₀ d'eau....... 2 °/₀ d'huile pour machines......	1	27	—	23,2	41,8	48,7	—
23 °/₀ d'eau.......	1	7	20	—	—	48,6	Huile de lin
23 °/₀ d'eau	1	7	20	—	—	50,4	Huile p. machines

On voit que l'addition d'huile à l'eau de gâchage ralentit notablement le durcissement, surtout dans le cas de l'huile de lin; même pour une résistance satisfaisante, les éprouvettes sont beaucoup moins dures au bout de 28 jours qu'avec le gâchage à l'eau pure. Par contre, l'immersion dans l'huile pendant 20 jours des éprouvettes âgées de 8 jours n'a eu aucun effet nuisible.

La lecture de ce rapport a été suivie d'une discussion intéressante.

L.-W. Walter a fait des essais en ajoutant 1 à 3 % d'huile à la pâte pure pour se rendre compte si le graissage préalable des moules, destiné à faciliter le démoulage des éprouvettes, n'a pas d'effet nuisible sur les résistances. Il n'a pas constaté d'effet de ce genre.

S.-A. Brown a préparé une série de godets en pâte pure et en mortier 1 : 2, puis il les a remplis de différentes sortes d'huile, telles que : huile de lin, suif, huile pour machines, pétrole.

Au bout d'un an, on ne constatait aucune trace de désagrégation, bien que les huiles de la série des hydrocarbures eussent pénétré très vite dans les pores du mortier, si bien que même le godet en pâte pure était complètement imbibé de pétrole. En opérant de la même façon avec diverses solutions, Brown a constaté que les godets remplis de chlorhydrate d'ammoniaque se fendaient et s'écaillaient sur les bords, sans cependant se désagréger complètement.

L'acide acétique attaque fortement le mortier avec formation d'une masse noire et molle, s'enlevant facilement. La soude caustique, la lessive de savon ou de cristaux de soude dissolvent la

mince couche superficielle à l'intérieur des godets; elles ont donné lieu dans certains cas à des exfoliations et des fentes.

Sur une question du président, R.-C. Lesley, relative aux plaintes fréquemment exprimées au sujet de l'attaque par les huiles de graissage des dallages en ciment dans les salles de machines R.-K. Meade fait observer que, bien que les massifs en béton de pierres calcaires qui supportent les paliers, dans les installations de la Dexter Portlandcement C°, soient inévitablement imbibés par l'huile employée au graissage des paliers, il n'a constaté, pendant 6 ans, aucun effet nuisible de ce fait. Au surplus, les essais effectués avec addition d'huile à l'eau de gâchage ne répondent pas aux conditions de la pratique, d'autant plus que les éprouvettes devraient être préparées avec le sable employé couramment et non avec le sable normal qui donne une compacité moindre aux mortiers.

A une question de Brown relative à la différence entre l'action des huiles animales et celle des huiles végétales, R.-K. Meade ajoute que pour toutes les huiles additionnées d'huiles animales en vue d'en augmenter l'adhérence, il se produit à la longue une décomposition avec formation de quantités notables d'acides gras. Ceux-ci sont d'ailleurs des acides faibles, de sorte que le béton leur résiste très bien. Dans la construction des hottes d'un laboratoire, l'emploi d'un enduit fait de ciment et de calcaire en poudre ayant donné lieu à une forte attaque par les acides, cet enduit a été remplacé par un autre, fait de ciment et de sable, qui a bien résisté par suite de la formation d'une couche protectrice de silice gélatineuse, provenant de l'attaque du ciment par les acides, et bouchant les pores à la surface. Là où il y a lieu de protéger le mortier de ciment contre l'attaque par les acides gras, le mieux est d'employer du gravier ou du sable quartzeux dans la confection du mortier.

ACTION DU PLATRE SUR LE CIMENT PORTLAND (1)

Un ciment prenant en 8 minutes, n'arrivait pas à avoir une prise lente avec 2 % de plâtre tamisé au tamis de 900 mailles. M. Moye a eu l'idée de chauffer le ciment à 200° avec la pierre à plâtre, pour permettre à l'eau d'hydratation du gypse d'agir sur la

(1) Dr Moye. *Tonindustrie Zeitung*, 1908, n° 11.

poudre de ciment. L'effet a été surprenant : le ciment est devenu à prise très lente. Avec une addition de seulement 1 % de gypse, M. Moye a obtenu un ciment prenant en 9 heures (au lieu de 8 minutes); le même ciment non additionné de gypse chauffé à 200° prenait en 9 minutes (au lieu de 8). Il y avait donc lieu d'attribuer le changement observé à l'action de l'eau d'hydratation du gypse; mais 1 gr. de gypse ne pouvant donner que 0 gr. 2 d'eau pour les 100 gr. de ciment mélangé, permettait d'hydrater le triple de chaux libre, c'est-à-dire 0 gr. 3, ce qui est bien peu; aussi M. Moye croit plutôt que le demi-hydrate de sulfate de chaux naissant, étant beaucoup plus soluble que le gypse naturel, agit plus énergiquement pour le ralentissement de la prise.

ACTION DE LA MAGNÉSIE SUR LE CIMENT PORTLAND (2)

Les dangers d'une teneur en magnésie trop élevée du ciment Portland ont été surtout mis en évidence par les mécomptes donnés dans la construction du palais de justice de Cassel, par l'emploi d'un ciment à haute teneur en magnésie. Ce ciment, provenant de la cuisson jusqu'à ramollissement de calcaires dolomitiques et rentrant, par suite, dans la catégorie des ciments naturels, donna lieu, au bout d'un certain temps, à des phénomènes d'expansion très marqués, surtout là où il avait été employé sans addition de sable. Le ciment, très dur d'ailleurs, se fissura fortement et, à l'église de Cassel même, de forts moellons furent brisés. La conséquence fut l'introduction, en 1885, de clauses extrêmement sévères dans les cahiers des charges.

En 1886, Lechartier constatait (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, mai 1886) des faits du même genre avec un ciment contenant de 22 à 35 % de magnésie. Les *Annales des Ponts et Chaussées* (1886, n° 362) rapportent la destruction de trois ponts de chemins de fer dans l'Ouest de la France, par suite de phénomènes d'expansion constatés un à deux ans après la construction, et attribuables à l'emploi d'un ciment de teneur en magnésie variant entre 16,2 et 28,15 %. Dyckerhoff a confectionné avec ce ciment des galettes qui donnèrent, au bout d'un an, des marques très nettes d'expansion; avec le mortier 1 : 3 les fissures ne se

(2) D'après R. Dyckerhoff, *Tonindustrie Zeitung*, XXXII, n° 23, p. 256, 22 février 1908. Cf. *Rev. des matér. de construction*, 1908.

produisirent qu'au bout de 3 ans; jusqu'à 10 ans on put mesurer une forte expansion. Enfin, des faits du même genre ont été relatés par Hayter (*Institution of civil Engineers,* novembre 1886).

L'analyse du ciment employé à Cassel a donné les résultats suivants :

	Analyse de Frésénius		Analyses de Boehme			
	Palais de justice	Eglise	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4
SiO^2	24,3	19,2	15,52	16,33	17,00	18,33
$Al^2O^3 + Fe^2O^3$ ..	9,1	11,1	9,11	9,11	7,65	7.68
CaO	39,4	41,1	33,55	43.50	39,36	41,25
MgO	27,1	28,4	29,88	28,65	27,65	28,57

C'est encore à des teneurs en magnésie de 20 à 28 % qu'il faut attribuer les destructions partielles de ponts constatées en 1889 dans le Palatinat, un certain nombre d'années après leur construction (1877).

Dans tous les cas, les ciments incriminés avaient satisfait aux essais d'invariabilité de volume, ils avaient été cuits jusqu'à ramollissement, et les phénomènes d'expansion ne se manifestèrent qu'au bout de plusieurs années, par la production de fissures dans des mortiers, très durs d'ailleurs.

C'est en 1876 que l'auteur, à la suite d'offres pour la fourniture de roches dolomitiques pour sa fabrique de ciment, entreprit les recherches dont il donne ici les résultats. Le ciment produit par la cuisson au four soufflé jusqu'à ramollissement des roches en question et par mouture jusqu'à 1 % de résidu au tamis de 900 mailles, contenait 10,82 % de magnésie; il satisfaisait à l'essai d'invariabilité de volume prescrit par les normes et à l'essai de chauffage à l'étuve des galettes à 100°. On prépara, en outre, des plaquettes en pâte pure, des éprouvettes de traction en mortier 1 : 3 et un prisme en ce même mortier destiné à la mesure de l'expansion par l'appareil à levier de Bauschinger. Au bout de 2 ans, les plaquettes montraient des fentes, tandis que les éprouvettes de mortier damé étaient intactes. Au bout de 2 ans et demi, on constata l'apparition sur le prisme d'un fin réseau de fissures, qui apparurent également au bout de 3 ans sur les éprouvettes de trac-

tion. La résistance à la traction, qui avait augmenté constamment pendant 26 semaines jusqu'à atteindre 22 kg. 5 par cm², tomba à 15 kg. 6 au bout d'un an, à 16 kg. 5 au bout de 2 ans, et à 7 kg. 6 au bout de 3 ans. L'expansion du prisme, très faible jusqu'à 26 semaines, devint ensuite très notable; elle atteignit, entre la deuxième et la troisième année, son maximum de 215 mm. par 100 mètres, et elle s'élevait encore à 69 mm. au bout de 15 ans.

On a maintes fois répété que ces phénomènes ne se manifestent qu'avec les ciments cuits jusqu'à ramollissement. C'est ainsi que les calcaires dolomitiques gris du Lahn donnent des mortiers qui n'ont montré, après des dizaines d'années, aucune trace d'expansion. Il en est de même du ciment romain d'Oberkammerloh, en Haute-Bavière, fait avec des matières crues contenant jusqu'à 27 % de magnésie; de même encore pour le ciment américain de Rosendale, qui contient 15,6 % de magnésie. La résistance à la traction de ce ciment va en croissant constamment jusqu'à 5 ans; l'augmentation de volume va en progressant jusqu'à 1 an, puis elle diminue entre la quatrième et la cinquième année. Les mêmes faits ont été constatés par l'auteur sur un ciment à 17,8 % de magnésie dont la cuisson au four soufflé n'avait pas été poussée jusqu'au ramollissement. Au surplus, le mélange à un ciment Portland non expansif de magnésie calcinée officinale (cuite à basse température) dans une proportion allant jusqu'à 20 %, ne rend pas le ciment expansif, tandis que la même addition de magnésie frittée donne lieu, au bout de 1 à 2 ans, à une expansion extraordinaire.

Dyckerhoff attribue ce fait à ce que la prise de la magnésie faiblement calcinée se produirait pendant les premiers temps du durcissement, alors que le ciment peut encore se prêter à l'augmentation de volume qui en résulte, tandis que l'hydratation de la magnésie frittée serait beaucoup plus lente et se produirait surtout après le durcissement. On doit admettre que la magnésie n'entre pas dans la constitution des silicates du ciment, mais se trouve à l'état libre; les phénomènes d'expansion dus à la magnésie se manifestent, en effet, d'autant plus rapidement et plus fortement que le ciment est fritté davantage.

Pour mettre en évidence la lenteur de l'hydratation de la magnésie frittée, Dyckerhoff a préparé des briquettes comprimées en magnésie calcinée officinale, les a cuites à la température de

cuisson du ciment Portland, et a obtenu par la mouture du produit une farine ayant un poids spécifique de 2,33, qu'il a éteinte avec un excès d'eau distillée, puis séchée à 100° jusqu'à poids constant. La quantité d'eau fixée n'était que de 3,44 %, elle augmentait de 4,19 % quand on eut renouvelé l'hydratation, alors que la quantité d'eau correspondant à la formation complète de l'hydrate est de 45 %.

Dans le but d'étudier de plus près les phénomènes d'expansion, la magnésie pulvérisée fut gâchée avec de l'eau, et la pâte obtenue fut introduite dans un petit moule conique annulaire en fonte. Le retrait qui suivit la prise fut tel que l'éprouvette traversait seulement l'anneau. Les premières fissures dues à l'expansion se manifestèrent au bout de 6 mois, en même temps que l'éprouvette ne passait plus à l'anneau; ces phénomènes allèrent ensuite en augmentant, mais l'éprouvette conserva sa dureté.

En vue de déterminer la teneur maxima à admettre pour la magnésie dans le ciment Portland, l'auteur a fait un grand nombre d'expériences sur des ciments à diverses teneurs en magnésie produits par la cuisson de mélanges de calcaire, d'argile et de dolomie. Ces mélanges étaient moulus de façon à ne pas donner plus de 1 % de refus au tamis de 900 mailles et, en outre, en raison de l'influence possible de la finesse des matières crues, on prépara également deux mélanges ne laissant pas de résidu sur le tamis de 1.600 mailles, ce qui peut être considéré comme l'extrême limite pratique de la finesse de mouture.

On a également prétendu que l'action de la magnésie serait différente selon qu'elle est simplement ajoutée au mélange cru ou qu'elle remplace une partie de la chaux de ce mélange. Deux sortes de mélanges furent donc préparés : dans le premier le rapport $\frac{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3}{CaO}$ était égal à $\frac{1}{1,83}$; dans le second, c'était le rapport $\frac{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3}{CaO + MgO}$ qui était égal à $\frac{1}{1,83}$

C'est intentionnellement qu'on a choisi une teneur en chaux pas trop élevée, de manière à obtenir un produit parfaitement stable. On n'en préleva pour les expériences que les roches bien frittées, qui furent moulues de manière à ne pas donner plus de 2 % de refus sur le tamis de 900 mailles. Tous les ciments obtenus

satisfaisaient à l'essai des galettes à l'eau froide, jusqu'à 28 jours, à l'essai de cuisson et même à l'essai à l'eau bouillante. La dilatation des ciments fut mesurée de la façon connue avec l'appareil de Bauschinger, aussi bien pour les éprouvettes en pâte pure que pour celles en mortier 1 : 3. Les résultats obtenus, ainsi que les résistances à la traction, ont été réunis dans des tableaux numériques par Dyckerhoff ; sa conclusion est que les ciments magnésiens cuits jusqu'à ramollissement montrent jusqu'à 4 semaines la même dilatation que les ciments Portland non expansifs ordinaires. L'essai normal ne donne rien, ainsi que tous les autres essais d'invariabilité de volume, en raison de ce que l'expansion due à la magnésie se produit trop tard.

Lorsque la durée du durcissement est prolongée, la dilatation des ciments magnésiens est notablement plus forte que celle des ciments Portland ordinaires; elle est déjà très nette au bout de 13 semaines. Un des ciments essayés, contenant 4,5 de magnésie, montrait non pas des phénomènes d'expansion, mais une dilatation bien plus grande que celle des ciments à faible teneur en magnésie. Pour le ciment I du tableau I publié par l'auteur, l'expansion proprement dite, reconnaissable à la production de fissures, se manifestait au bout des délais suivants :

Teneur en MgO	*a*) Pâte pure	*c*) Mortier 1 :3
5,26 %	5 à 6 ans	Pas d'expansion
6,14 »	4 à 5 »	Pas d'expansion
7,81 »	4 à 5 »	5 à 6 ans
11,26 »	3 à 4 »	4 à 5 »
17,80 »	13 à 26 semaines	1 à 2 »
21,24 »	13 à 26 »	1 à 2 »

L'expansion se manifeste donc d'autant plus vite que les ciments contiennent plus de magnésie; elle apparaît plus rapidemet sur les éprouvettes en pâte pure que sur celles en mortier. Ces résultats concordent avec ceux de la pratique : on sait, en effet, que les mortiers maigres fabriqués avec des ciments à 6 % et plus de magnésie ne montrent pas d'expansion.

La magnésie frittée donne seule lieu à l'expansion, et cela d'autant plus que le frittage a été plus intense. Toutes les causes qui

facilitent ce dernier augmentent donc les phénomènes d'expansion, notamment la finesse de mouture du mélange cru et la diminution de la teneur en chaux par la substitution de magnésie. Les éprouvettes conservées à l'air sec ne montrent pas de traces d'expansion, même avec les ciments les plus magnésiens ; la magnésie ne peut, en effet, alors s'hydrater.

Dyckerhoff conclut de ses travaux qu'il est parfaitement possible de fabriquer des ciments contenant 5 ou 6 % de magnésie, et fortement cuits, qui ne donnent pas lieu à des phénomènes d'expansion, surtout dans le cas du mortier. Toutefois, comme ces ciments se dilatent plus que les ciments Portland ordinaires, en raison de leur moindre résistance due à une teneur en chaux plus faible, et comme on peut toujours craindre une certaine expansion avec les mortiers gras, on peut conclure en toute sécurité à l'admission, pour le ciment Portland, d'une limite supérieure de 4 % pour la teneur en magnésie.

FABRICATION DE CIMENT PORTLAND AVEC DES MATÉRIAUX RICHES EN MAGNÉSIE (1)

L'effet de la magnésie sur le ciment a été pendant longtemps un sujet de recherches et d'essais, et les résultats fournis par ces recherches ont souvent varié suivant les expérimentateurs.

Parmi les dernières études publiées, citons celle de MM. Campbell et White, de l'Université de Michigan, et celle du Dr Dyckerhoff, le savant ingénieur allemand, qu'on vient de lire.

Ces deux études ne conduisent pas aux mêmes conclusions. D'après Campbell et White, la magnésie n'exerce aucune influence nuisible sur le ciment Portland, pourvu que les différends éléments du ciment soient dosés convenablement. Le Dr Dyckerhoff, de son côté, trouve que le volume du ciment Portland diminue avec sa teneur en magnésie. Des deux côtés, les essais consistent à mesurer l'expansion des barres de ciment pur et de mortier à 1/3 de sable, et à déterminer la résistance à la traction à différentes époques. Les expériences du Dr Dyckerhoff, se sont étendues sur une durée de 10 ans, celles des Américains furent plus courtes.

En outre, le Dr Dyckerhoff semble avoir opéré sur des ciments

(1) D'après Richard Meade, *Cement age*, déc. 1908. Cf. *Rev. matér. de Constr.*, 1909.

dont les proportions étaient mal établies. Ainsi, par exemple, le poids moléculaire de la magnésie (MgO) est de 40,4 tandis que celui de la chaux (CaO) est de 56,1 : donc 1 de magnésie équivaut à 1,39 de chaux.

Parmi les ciments employés par le Dr Dyckerhoff, ceux portant les nos 1 et 7 avaient la composition suivante :

	No 1	No 7
Silice	21,96	20,47
Sesquioxyde de fer et d'alumine	10,03	9,58
Chaux	61,88	58,71
Magnésie	1,73	6,14

En ramenant la magnésie à la chaux dans le n° 1, on obtient 3,41 %, ce qui fait pour les bases un total de 65,29.

D'une façon analogue dans le n° 7 nous avons 8,53 de magnésie ramenée à la chaux, d'où un total de 67,34 comme base. Voyons maintenant les proportions de silice, oxyde de fer et alumine par rapport aux bases.

Le ciment n° 1 donne.................. $\frac{31,99}{64,29} = \frac{1}{2,10}$

Le ciment n° 7 donne.................. $\frac{30,05}{67,24} = \frac{1}{2,20}$

Ce qui montre que le ciment n° 7 est *trop basique* et qu'il ne contient pas assez de silice, fer et alumine pour saturer les bases, laissant ainsi une partie de ces dernières à l'état libre.

Les professeurs White et Campbell trouvent que si la magnésie est convenablement mélangée elle ne produit pas d'expansion, mais elle diminue assez fortement la résistance. Les essais du Dr Dyckerhoff confirment ces faits Donc les expérimentateurs sont daccord sur le point suivant : la magnésie ne profite certainement pas au ciment.

La magnésie dans le ciment ne semble avoir aucune valeur hydraulique. Il existe des composés magnésiens qui possèdent de grandes propriétés liantes; ainsi l'oxychlorure de magnésium. Ce composé connu sous le nom de ciment Sorel (du nom de l'inventeur) est encore assez employé.

Comme il est très expansif, on ne peut l'employer pour de grands travaux en béton; mais, à un certain moment, on l'employa beaucoup pour les petits travaux d'ornementation. Le ciment So-

rel est plus dur que le ciment Portland et pour cette raison il est employé dans la fabrication de la pierre émeri. Il dure autant que le ciment Portland et résiste aussi, paraît-il, à l'eau de mer.

Meade avait pensé, à un certain moment, que si on ajoutait au ciment du chlorure de calcium, celui-ci ralentirait sa prise et augmenterait aussi ses propriétés liantes en formant avec la magnésie un oxychlorure, transformant ainsi la magnésie inerte en une substance tendant à durcir la masse.

Si dans un ciment, la magnésie libre est sous la forme sous laquelle elle cause l'expansion de la masse, il doit être possible de constituer des ciments à teneur élevée en magnésie et qu'on pourra employer sans inconvénients dans les travaux en béton.

On fit aussi du ciment dans lequel entrait de la dolomie en faisant en sorte que $\frac{SiO^2 + Fe^2O^3 + Al^2O^3}{CaO + Mgo} = \frac{1}{2}$ la magnésie étant calculée en chaux.

Voici l'analyse de ce ciment :

Silice	21,94
Sesquioxyde de fer et alumine	10,66
Chaux	55,72
Magnésie	6,59
Anhydride sulfurique	0,38
Chlore	1,06

Au point de vue des essais physiques, le ciment donna une poudre de finesse normale et son temps de prise fut bon également. Il résista bien aux différents essais à la vapeur, à l'eau bouillante et à l'eau chaude.

Il a donné les résultats suivants pour un mortier à 3 parties de sable quartzeux broyé :

7 jours	1 kg 35
28 jours	1 kg 75
3 mois	1 kg 92
6 mois	2 kg 03
1 an	2 kg 15

Meade prit un brevet concernant à la fois le principe et le procédé de fabrication de ce ciment. Patente n° 866.376, 17 septembre 1907.

La question de la fabrication de ciment Portland au moyen de matériaux riches en magnésie présente un intérêt économique

dans diverses contrées. Dans la « Lehigh Valley », le ciment Portland est fabriqué avec un calcaire argileux appelé « Cement Rock ». Il contient en général 65 à 75 % de carbonate de chaux et 18 à 30 % d'argile totale.

Lorsqu'il contient moins de 75 % de chaux il est nécessaire d'y ajouter une certaine quantité de calcaire, pur de préférence, pour arriver à avoir dans le mélange une quantité de carbonate de chaux voisine de 75 %. On trouve dans le voisinage du dépôt de « Cement Rock » un calcaire à forte teneur en magnésie et il n'y a pour ainsi dire pas dans cette contrée de pierre à chaux qui ne soit pas magnésienne. On n'a pu jusqu'à présent s'en servir, car le ciment Portland en résultant contiendrait de 6 à 10 % de magnésie; il a donc fallu chercher du calcaire au loin, ce qui augmentait considérablement le prix de revient. C'est ainsi que dans certaines usines on est obligé d'employer une demi-tonne de calcaire par tonne de « Cement rock » et de faire venir celui-là d'un pays distant de plus de 200 km. Il est certain que si ces usines pouvaient employer les calcaires magnésiens situés dans leur voisinage, elles réduiraient de beaucoup le prix de revient du ciment.

Dans la plupart des cas les dépôts de calcaire magnésien sont immédiatement adjacents aux carrières de « Cement Rock ». Pour beaucoup d'usines, les dépôts de ce dernier sont complètement épuisés, et il ne reste plus que du calcaire riche en magnésie auquel on n'a pas touché jusqu'à présent. Il serait donc intéressant pour ces industriels de profiter des avantages du nouveau procédé pour utiliser ces dépôts.

Pratiquement les auteurs conseillent de mélanger au « Cement Rock » ou autre produit du calcaire riche en magnésie en quantité suffisante pour que le rapport $\frac{\text{chaux} + \text{magnésie}}{\text{silice} + \text{alumine} + \text{oxyde de fer}}$ soit égal à $\frac{1}{2}$. Le mélange est alors réduit en poudre impalpable; on opère la cuisson jusqu'à commencement de vitrification et on ajoute aux clinkers de 1 à 10 % de chlorure de calcium. On pulvérise alors à la finesse voulue. La proportion de chlorure de calcium ajoutée au mélange dépend de la quantité de magnésie contenue dans le ciment. On obtient de bons résultats en incorporant 2 % de chlorure de calcium à un ciment contenant 8 à 10 % de

magnésie. Si cette dernière est en plus grande quantité, il faut augmenter la dose de chlorure.

On peut ajouter un peu de plâtre aux clinkers avant le broyage si l'on trouve que c'est nécessaire pour régulariser la prise. Cependant le chlorure de calcium agit lui-même de façon analogue. En effet, d'après Meade, ce dernier sel est le corps le plus efficace que l'on connaisse jusqu'à présent pour retarder et régulariser la prise du ciment.

Notons en outre que le chlorure de calcium empêche dans une certaine mesure l'action de la gelée, qu'il augmente la densité du béton, le rendant par conséquent plus imperméable à l'eau et qu'en outre il ne produit pas d'efflorescence.

SUR LA DÉSAGRÉGATION SPONTANÉE, PAR REFROIDISSEMENT A L'AIR DE CERTAINES ROCHES DE CIMENT PORTLAND (1)

On a souvent remarqué que certaines roches de ciment Portland s'effritent spontanément en se refroidissant à l'air.

On attribue parfois ce phénomène à la présence d'un excès de sable dans le mélange cru, dû à une mauvaise préparation de ce mélange par voie humide. Il est facile de s'en assurer en faisant chaque jour au moins une détermination de sable.

Il faut renoncer à cette explication dès que, pour un même mélange passé à différents fours, il ne tombe en poussière que les clinkers de certains de ces fours. On attribue souvent ce fait à une surcuisson du clinker, qui prend alors une coloration rousse, ou encore à une diminution de la teneur en chaux de la masse par suite du mélange des cendres du combustible, jusqu'à la limite où les clinkers ne sont plus stables à l'air. Ce dernier cas se produit surtout avec des charbons riches en matières minérales et pour les ciments à indice élevé ; la désagrégation due à l'action des cendres ne se produit alors que superficiellement, et l'on constate que la poussière obtenue est plus siliceuse et moins calcaire (d'environ 2 %) que le noyau solide.

Enfin, lorsque le mélange a une composition convenable, on peut attribuer la cause du même phénomène, dans un four Schneider par exemple, à un défaut de tirage, dû à un briquetage ou à un chargement défectueux. Il se forme alors, aux places en ques-

(1) Cf. *Rev. des matér. de constr.*, 1905, p. 41.

tion, des amas de poussière cristalline de ciment, de couleur blanche, contenant presque toujours à l'intérieur un fragment de coke. L'emploi de coke riche en matières minérales donne, d'autre part, lieu à la formation de mélanges très siliceux par places. Il en est de même lorsqu'on incorpore au briquetage du fraisil de coke, car de nombreuses analyses ont montré que la teneur en cendres de ce fraisil peut varier de 10 à 41 %.

L'INDUSTRIE DES CIMENTS ET DES CHAUX HYDRAULIQUES DEVANT LES CONSOMMATEURS. RÉFORMES PROPOSÉES POUR L'ESSAI ET LA VENTE DES CIMENTS. Note de M. H. Le Chatelier (1)

M. Henri Le Chatelier a publié dans la *Revue de Métallurgie* un article extrêmement intéressant sur les chaux et ciments. C'est toute une réforme que propose M. Le Chatelier, aussi bien dans la réception des produits hydrauliques que dans leur vente. Voici son article *in-extenso :*

Les progrès des différentes industries dans un même pays et à une même époque, sont très variables. On ne saurait établir une comparaison entre l'évolution accélérée de la métallurgie et la tranquille stagnation de l'industrie des chaux hydrauliques. Si un petit propriétaire de forges au bois de la Champagne, vivant il y a cinquante ans, revenait aujourd'hui dans une des grandes aciéries de l'Est, il admettrait difficilement une filiation ininterrompue entre sa vieille usine actionnée d'une façon intermittente par la main-d'œuvre paysanne et les usines modernes marchant en quelque sorte toutes seules par des procédés purement mécaniques. Par contre, le fabricant de chaux hydraulique se retrouverait absolument chez lui. Il croirait se réveiller seulement d'un court sommeil : le même ouvrier remue à la pelle la chaux éteinte dans les fosses et continue à faire le même travail de forçat. Il lui faudrait quelques jours d'examen attentif pour reconnaître des perfectionnements de détail, une transmission de force électrique, quelques broyeurs plus puissants.

Les progrès ou la stagnation d'une industrie tiennent à des causes multiples, scientifiques, techniques, économiques et politiques. La découverte des procédés de déphosphoration a joué un grand rôle dans le développement de la métallurgie de l'Est. L'ini-

(1) *Revue de Métallurgie*, oct. 1907.

tiative hardie de Carnegie a créé aux Etats-Unis cette admirable industrie à laquelle nous empruntons aujourd'hui ses machines et ses hauts fournaux. Dans d'autres milieux, une grève opportune a secoué l'indolence d'industriels engourdis par une trop longue prospérité. Tel a été le cas des fabriques de porcelaine en France, redevables aux grèves de Limoges et de Vierzon de l'introduction des procédés de coulage et de quelques autres perfectionnements importants.

Parmi les nombreux facteurs du progrès industriel, il en est un souvent passé sous silence : l'intervention du consommateur ; son action est d'autant plus dangereuse qu'elle est généralement inconsciente ; le consommateur ne se doute pas des répercussions lointaines de son ignorance et de sa négligence. Peu d'industries en France en ont souffert comme celle des produits hydrauliques. Un exemple typique en donnera la preuve. Ce sont des faits du temps passé, on peut donc en parler maintenant en toute liberté.

La série des prix de la ville de Paris contenait autrefois une mention équivalente à la suivante, en tout cas bien innocente à première vue :

Les mortiers sont dosés en volume, tant de litres de chaux ou de ciment par mètre cube de sable.

Cette simple mention a suffi pour paralyser pendant de longues années toute l'industrie de la chaux hydraulique dans le bassin parisien. Cela peut sembler singulier, il suffit cependant de deux minutes de réflexion pour s'en rendre compte : l'entrepreneur achète la chaux au poids, il paye au poids les droits d'octroi, de même les frais de transport. Mais, d'après la série de prix il revend ensuite la chaux à son client au volume. Il faut donc qu'un poids donné lui rende le plus grand volume possible. Toute l'industrie s'est organisée pour fabriquer des chaux hydrauliques ne pesant pas plus de 500 kg. au mètre cube, c'est-à-dire des chaux dépourvues de toute propriété de durcissement. On est arrivé à en obtenir ne donnant pas même 1 kg. de résistance à vingt-huit jours. C'est un résultat industriel remarquable, on ne croirait pas *a priori* à la possibilité de réaliser une aussi mauvaise fabrication. Logiquement même, on aurait dû livrer de la chaux grasse sous le nom de chaux hydraulique. Si on ne l'a pas fait, c'est sans doute parce que la cuisson des calcaires purs consomme plus de charbon que celle des calcaires argileux.

Plus d'une fois à Paris, de malheureux entrepreneurs ont été poursuivis pour avoir tué leurs ouvriers par l'effondrement de maisons en construction. En bonne justice, on aurait dû poursuivre avec eux la Société des Architectes responsable de la fameuse série de prix.

La disparition de cet état de choses est due à l'intelligente initiative de quelques fabricants de chaux de Beffes, auxquels j'ai été heureux de prêter en l'occasion mon concours. En présence des progrès incessants du ciment à Paris, repoussant devant lui des chaux d'aussi mauvaise qualité, ils ont compris la nécessité de réagir et d'améliorer leur fabrication. Par une entente plus ou moins licite avec quelques grands entrepreneurs et avec certains consommateurs mieux au courant des questions industrielles, ils ont obtenu de faire mesurer le volume au poids. Le sac de 50 litres serait défini par un poids de 25 kg., application bizarre du système métrique. Le sac était toujours l'unité de mesure, mais on s'en servait sans le remplir.

Depuis un certain temps déjà, la série de prix de la ville de Paris a été révisée sur ce point. Les mortiers sont maintenant dosés au poids à Paris, comme ils l'étaient depuis longtemps déjà dans bien des villes de France et dans toutes les grandes administrations de l'Etat.

Il serait trop long de passer en revue par le détail toutes les erreurs semblables et de discuter l'influence qu'elles ont pu avoir sur l'industrie. Je n'en retiendrai ici que deux plus particulièrement importantes par leur fréquence et par la gravité de leurs conséquences.

I

La plus grave erreur des consommateurs de ciment est de se payer trop facilement de mots. Avant de demander à un fabricant quelle est la qualité de ses produits, ils se préoccupent d'abord de savoir quel est leur nom. Pour bien vendre son ciment, il est beaucoup plus important de lui trouver un nom ronflant que d'en améliorer la fabrication. Un consommateur auquel on offrirait du ciment de laitier tout court se méfierait, il faut lui dire que c'est du ciment Portland de laitier. Il sait parfaitement que du ciment de laitier n'est pas du ciment Portland, mais l'emploi de cette dénomination fausse est à ses yeux une marque de déférence

à son égard, il l'interprète comme la promesse d'être traité en client sérieux; aux deux dénominations : ciment de laitier et ciment Portland de laitier, ne doivent pas correspondre dans son esprit à la même qualité de produits. Cette idée fixe qu'à un nom déterminé correspond une qualité déterminée est une erreur tout à fait générale; j'ai été consulté plus d'une fois par des architectes ou des ingénieurs, me demandant si pour tel travail il fallait donner la préfréence à la chaux lourde, à la chaux légère ou au ciment. A une semblable question il n'y a qu'une réponse à faire : mettez les noms dans un chapeau et tirez au sort; en tirant la chaux légère ou le ciment, vous pourrez indifféremment avoir de la chaux grasse, du ciment de première qualité, ou du calcaire broyé, cela dépendra de l'usine à laquelle la commande sera faite, de son degré de conscience et du degré de considération qu'elle accorde au consommateur l'interpellant, c'est-à-dire du chiffre d'affaire dont il est jugé capable et de la compétence qu'on lui suppose.

Il suffit de dresser la liste des noms employés dans l'industrie des produits hydrauliques, pour comprendre de suite qu'ils ne peuvent avoir aucune signification, ils sont beaucoup trop nombreux; en voici un certain nombre, on en trouverait facilement bien d'autres encore :

Ciment naturel, ciment artificiel, ciment Portland, ciment lent, ciment demi-lent, ciment rapide, ciment pouzzolane, ciment de laitier, ciment de grappier, ciment Portland de laitier, ciment Portland naturel, ciment Portland de grappier, ciment blanc, ciment gris, ciment de fer, ciment n° 1 et ciment n° 2, demi-ciment, petit ciment, ciment tout-venant, ciment mélangé, ciment maritime, ciment à la mer, ciment indécomposable, ciment romain, ciment belge, ciment Wassy; sans compter les noms propres particuliers appartenant à telle ou telle usine, tels que ciment Villeneuve, ciment Lonquéty, ciment Lafarge, ciment Roquefort, ciment Gazelle, etc., etc., de même une série pour les chaux : chaux lourde, chaux légère, fleur de chaux, chaux administrative, chaux d'entrepreneur, chaux n° 1, chaux n° 2, chaux-laitier, chaux tout-venant, chaux à la mer, chaux siliceuse, chaux alumineuse, chaux maritime, chaux éminemment hydraulique, chaux artificielle, chaux naturelle, etc., etc.

Plusieurs de ces noms différents s'appliquent au même produit,

non seulement dans des usines différentes, mais dans la même usine. Si un client important que l'on tient à satisfaire ne veut pas pour un produit donné payer le prix de tout le monde, on peut être amené en faisant cette concession à changer la dénomination du produit pour éviter d'en déprécier la marque; réciproquement, le même nom s'applique à des produits très différents d'une usine à l'autre et aussi dans la même usine. Il faut considérer comme absolument insoluble le problème que j'ai vu parfois se poser des consommateurs trop confiants, qui cherchaient à se rendre compte de la signification des dénominations multiples employées dans les usines avec lesquelles ils étaient en relations d'affaires.

On pourrait rapprocher, quoique de loin, cette situation d'une ancienne tradition tendant à disparaître aujourd'hui, relative au commerce des aciers à outils. Les diverses qualités étaient affublées de noms bizarres et en nombre illimité : tête de bœuf, trois points, corne de licorne, Aquilon, rapide, R. F., etc. L'intérêt de la confusion ainsi créée était d'ordre commercial et reposait essentiellement sur la naïveté du consommateur; quand celui-ci se plaignait de l'insuffisance de qualité des aciers qui lui étaient fournis, en appuyant sa plainte de considérations souvent fort peu judicieuses, le fabricant pouvait, en le remerciant avec effusion de ses conseils, lui renvoyer le même acier sous un nom différent, et cela suffisait le plus souvent pour le satisfaire, sans qu'il fût même nécessaire d'appuyer les bonnes paroles d'arguments mieux sonnants.

Le jour où les consommateurs de chaux et de ciment auront compris que toutes les dénominations employées dans cette industrie sont, *sans aucune exception*, dépourvues de toute valeur, un grand progrès aura été réalisé; je dis intentionnellement *sans aucune exception*, car même les expressions fondamentales de chaux et de ciment ne signifient plus rien aujourd'hui. Un exemple emprunté à la métallurgie fera comprendre ce qui s'est passé : il y a 50 ans, le fer, l'acier et la fonte constituaient trois produits absolument distincts, séparés à la fois et par leurs procédés de fabrication et par leurs usages; aujourd'hui le fer, l'acier et la fonte forment une série ininterrompue dans laquelle il est impossible de tracer une ligne de démarcation, aussi bien en se plaçant au point de vue des procédés de fabrication que des usages du mé-

tal, et l'habitude s'est très justement répandue de ne plus employer qu'une seule dénomination, celle d'acier qui comprend ce que l'on appelait autrefois le fer, l'acier et même certaines variétés de fontes.

De même dans l'industrie des produits hydrauliques, il y avait autrefois la chaux et le ciment, absolument distincts par leurs procédés de fabrication et leurs qualités; la chaux était pulvérisée par extinction sans aucun broyage mécanique, c'était un produit à bon marché, qualité médiocre; le ciment était préparé par cuisson d'un mélange artificiel ou calcaire et d'argile, suivi d'un broyage sans aucune extinction de la matière cuite : c'était un produit très cher, mais de qualité supérieure. Il y avait la même différence entre le ciment et la chaux qu'entre l'acier cémenté fondu au creuset et le fer puddlé. Aujourd'hui cette démarcation n'existe plus, ni dans les procédés de fabrication, ni dans la qualité des produits obtenus, ni dans leur provenance. Il n'y a plus une usine à ciment qui n'éteigne ses produits, j'en ai encore vu une en France, il y a une dizaine d'années, qui n'arrivait d'ailleurs pas à faire accepter de la clientèle son ciment trop gonflant et à laquelle j'ai signalé son erreur : ce devait être la dernière. Réciproquement les bonnes usines à chaux hydraulique broyent leur chaux; cette pratique serait depuis longtemps devenue absolument générale, si les consommateurs de chaux hydraulique n'avaient pas parfois une si grande terreur de tout changement et ne s'opposaient pas à des progrès qu'ils devraient au contraire imposer.

Si l'on veut sortir de la confusion actuelle, il faut à tous les produits hydrauliques donner un même nom, celui de ciment par exemple, en complétant ce terme par l'indication précise de la grandeur d'une qualité essentielle pouvant servir à donner la définition d'un produit envisagé ; on dit en métallurgie un acier à 40 kg., un acier au silicium à 80 kg., on peut faire exactement la même chose pour les ciments, nous dirons plus loin comment.

II

Une seconde erreur des consommateurs de produits hydrauliques est de se désintéresser trop complètement des moyens leur permettant d'apprécier la qualité des produits qui leur sont livrés; ils le font pour des motifs variés : les ingénieurs des Ponts-et-Chaussées ne croient pas en général aux essais de réception, les

architectes et les gros entrepreneurs les considèrent comme trop compliqués pour s'en servir, les petits entrepreneurs et les maçons en ignorent même l'existence. Le scepticisme des ingénieurs des Ponts et Chaussées est d'autant moins explicable qu'en France ils ont seuls étudié les essais de ciment, ils ont rédigé tous les cahiers des charges actuellement en vigueur; on comprendrait cette méfiance en Allemagne où les essais de réception ont été étudiés à peu près exclusivement par les fabricants de ciment et imposés par eux aux administrations publiques; chez nous au contraire, les fabricants n'ont pour ainsi dire pas été consultés. Cette méfiance des uns, cette indifférence des autres a des conséquences regrettables. N'ayant pas confiance dans les essais réguliers, on cherche à n'employer que des matériaux ayant depuis de longues années fait leurs preuves dans les travaux, et pour atteindre ce but on s'oppose à toute modification, et par suite, à toute amélioration de la fabrication. En fait cette immobilité est impossible à obtenir, on ne peut pas plus arrêter aujourd'hui l'évolution de l'industrie que le mouvement de rotation de la terre, mais on peut au moins l'entraver, lui donner une direction nuisible; on détourne les fabricants de tout effort vers l'amélioration de leur fabrication, mais on ne réussit pas à les empêcher de tenter des modifications de nature à abaisser le prix de revient, parfois au détriment de la qualité.

D'heureuses inconséquences viennent de temps en temps, il est vrai, paralyser cette tendance néfaste des consommateurs; on demandera, par exemple à une usine de conserver ses procédés de fabrication d'il y a 50 ans, mais en même temps, on exigera une régularité de fabrication inconnue dans les temps anciens, des résistances deux ou trois fois plus élevées que par le passé, sans se rendre compte que, si la fabrication reste identique, la qualité des produits ne peut changer.

Cette méfiance générale au sujet des essais de réception conduit encore, lorsqu'on est obligé de s'en servir, à en multiplier indéfiniment le nombre; ce reproche est aussi bien mérité, d'ailleurs, par les consommateurs de métaux que par ceux de ciment. On introduit dans les cahiers des charges dix clauses mauvaises là où il suffirait d'une bonne, et l'on crée aux fabricants des difficultés inextricables dont le consommateur supporte en fin de compte toutes les conséquences, tant au point de vue du prix que de la

qualité. En fait, il est possible, avec des essais peu nombreux et relativement simples de s'éclairer d'une façon complète sur les qualités nécessaires pour les chaux et les ciments dans les neuf dixièmes au moins de leurs applications.

III

Nous passerons rapidement en revue ces essais essentiels et la manière de s'en servir : ils sont au nombre de trois :

Essais de rapidité de prise;

Essais d'invariabilité de volume;

Essais de résistance.

1° *Essais de rapidité de prise.* — Il est très utile d'avoir une prise aussi lente que possible, cela est indispensable quand on a affaire à des ouvriers peu soigneux et non surveillés, qui préparent toujours leur mortier de longues heures à l'avance et le noient d'un grand excès d'eau pour pouvoir arriver quand même à l'employer.

On fait actuellement deux essais de prise : l'un pour le commencement de la prise et l'autre pour la fin. Ce dédoublement de l'essai est une superfétation absolument inutile; il faut certainement que le ciment achève sa prise, mais s'il ne le faisait pas, l'essai de résistance serait là pour le montrer. Des deux essais, le meilleur à conserver, au moins avec le mode opératoire actuel à l'aiguille Vicat, est celui du commencement de la prise, beaucoup plus facile à observer.

Le mode opératoire choisi importe peu d'ailleurs, pourvu que l'on en adopte un et que toutes les conditions en soient bien définies; l'ancien essai au pouce aurait parfaitemet pu être conservé. Si on voulait au contraire perfectionner cet essai, il faudrait, au lieu de mesurer le temps après lequel le ciment a pris une dureté déterminée définie par l'aiguille Vicat ou la pression du pouce, mesurer la dureté qu'il a pris après un temps déterminé, par exemple la résistance à l'écrasement en kg. par centimètre carré de briquettes de mortier plastique; cela augmenterait la précision de l'essai et éviterait les tâtonnements successifs nécessités par l'emploi de l'aiguille Vicat. Pour le moment l'essai à l'aiguille Vicat étant d'un usage courant doit être conservé.

Cet essai ne demande pas de mesures particulièrement précises, parce que pour les divers produits hydrauliques le temps de prise

varie entre des limites extrêmement éloignées, dans le rapport de 1 à 100 et plus : des mesures exactes à 25 % près sont largement suffisantes.

Quel temps de prise doit-on exiger? Il y a, comme on l'a indiqué plus haut, intérêt à avoir une prise aussi lente que possible; mais on est limité par la nécessité contraire d'avoir une très grande résistance au bout d'un temps pas trop long; les ciments à très haute résistance ont nécessairement une rapidité de prise plus grande. Il semble que dans l'état actuel, on puisse exiger pour les produits de bonne qualité un commencement de prise après une durée variant de une heure à quatre heures pour des ciments dont la résistance en mortier plastique à sept jours varierait de 15 à 3 kg. Bien entendu, avec un certain nombre de chaux hydrauliques actuelles, qui n'ont d'hydraulique que le nom, et qui n'ont pas encore pris une résistance mesurable à vingt-huit jours, on a des durées de prise bien plus longues, dépassant vingt-quatre heures.

2° *Essais d'invariabilité de volume.* — Il ne faut évidemment pas que le ciment après avoir fait prise se relâche, comme cela arrive parfois, et perde momentanément sa dureté pour recommencer ultérieurement un nouveau durcissement; ce défaut tient toujours à la présence de chaux ou de magnésie non combinée, dont l'extinction tardive provoque la désagrégation partielle de la masse déjà durcie. L'essai d'invariabilité de volume à l'eau bouillante donne toute garantie contre ce manque de qualité; on peut employer cet essai sous sa forme actuelle, avec le moule fendu à aiguilles ou sous une forme plus simple encore consistant à mesurer avec un pied à coulisse l'augmentation des dimensions de briquettes en ciment pur, durcies pendant vingt-quatre heures à la température ambiante, puis chauffée trois heures dans l'eau bouillante.

Dans le cas de l'emploi du moule fendu à aiguilles on doit exiger que l'écartement des pointes des aiguilles ne dépasse pas une longueur de 5 ou de 15 mm. suivant qu'il s'agit de produits de premier choix ou de qualité secondaire.

3° *Essais de résistance mécanique.* — L'essai de résistance est celui auquel on attache en général le plus d'importance, sa réalisation comporte malheureusement de nombreuses causes d'incertitudes sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

On a, pendant un temps, cherché à atténuer ces causes d'erreurs en multipliant les formes sous lesquelles on faisait cet essai : Essais à la traction, essais à la compression, essais à la flexion. On a aujourd'hui très sagement renoncé à cette complication absolument dépourvue d'utilité, on ne fait plus que des essais à la traction; on pourrait d'ailleurs aussi bien faire uniquement les essais à la flexion ou uniquement des essais à la compression : les résultats de ces divers modes d'essais sont suffisamment parallèles pour que l'on puisse indifféremment prendre l'un d'entre eux, à condition bien entendu de toujours et partout employer le même. On invoque en faveur de l'essai à la flexion l'avantage de la plus grande simplicité des appareils; l'essai à la compression, par contre, est peut-être des trois celui qui donne le plus facilement des résultats concordants, et c'est là le point essentiel. Quoi qu'il en soit, l'essai à la traction est le seul employé aujourd'hui, il faut au moins provisoirement, continuer à l'employer.

Dans certains cahiers des charges on conserve à la fois un essai sur pâte pure et un essai sur mortier. C'est une erreur; on emploie toujours le ciment en mortier, on doit l'essayer de même; on n'a jamais, d'ailleurs, donné une raison plausible quelconque en faveur du double essai, c'est une tradition surannée qu'il faut se décider à abandonner complètement. Le seul essai à conserver est l'essai sur mortier plastique, sur le mortier dont la composition et le mode de préparation ont été définis dans les cahiers des charges du ministère des Travaux publics.

Reste à préciser le temps au bout duquel les ruptures de briquettes doivent être faites; aujourd'hui on fait ces ruptures à 7 jours et à 28 jours et parfois une troisième à 84 jours. Cette multiplicité des dates de ruptures, et la prolongation des essais qui en résulte, a le grave inconvénient de rendre, dans bien des cas, la réalisation des essais impossible, le ciment étant déjà employé ou expédié par mer avant leur achèvement. D'autre part, au point de vue des travaux, les résistances initiales sont les plus intéressantes ; on a toujours en fin de durcissement après un an ou deux une résistance suffisante. Quand le ciment donne des mécomptes : effondrement des maisons en construction, de ponts, de charpentes en béton armé, rupture par les vagues de blocs immergés prématurément, c'est toujours au début du durcissement que ces accidents se produisent. Dans les conditions actuelles d'emploi

des ciments, où la rapidité des travaux croît tous les jours, dans les conditions actuelles de leur fabrication avec des moutures de plus en plus fines, l'essai de résistance à 7 jours doit, sans aucune hésitation, être exclusivement adopté pour les essais de réception.

Une innovation aussi brutale effrayera sans doute quelques ingénieurs qui craindront de s'exposer à des mécomptes si par hasard la résistance de leur ciment ne continuait pas à croître après 7 jours ; on peut donner satisfaction à ce sentiment très légitime en prévoyant un second essai à date plus éloignée, qui ne serait dans aucun cas un essai de réception, c'est-à-dire ne pourrait donner lieu à un refus d'une fourniture de ciment, mais entraînerait seulement des amendes plus ou moins fortes si les résistances garanties après cette seconde durée n'étaient pas atteintes.

La durée la plus convenable pour ce dernier essai serait de 84 jours, c'est un chiffre moyen. Il pourrait certainement être raccourci pour les ciments artificiels dont le durcissement est très rapide; il devrait par contre être allongé pour les chaux et ciments à prise rapide dont le durcissement est plus prolongé, mais les motifs qui pourraient engager à faire varier la durée de ce second essai suivant la nature des produits ne sont pas suffisants pour renoncer au très grand avantage d'avoir pour tous les produits une durée uniforme d'essais.

Les chiffres de résistance à demander doivent, bien entendu, varier suivant les travaux en vue et les sommes que l'on doit y consacrer. On peut avoir aujourd'hui sans difficultés, dans l'essai à 7 jours, sur mortier plastique, des résistances variant de 0 à 15 kg. par centimètre carré et même à 20 kg. pour des produits de première qualité. Pour l'essai à 84 jours on devrait demander 10 kg. en sus de la résistance exigée à 7 jours, quelle que soit la valeur de celle-ci. Les résistances finales, en effet, ne croissent pas proportionnellement à leur valeur initiale. A la longue tous les produits tendent, au moins dans les essais, à se rapprocher ; cela doit tenir en partie à la carbonatation superficielle des briquettes dans les bacs de conservation, qui amène la surface des briquettes à un état final en quelque sorte indépendant de la nature primitive du liant.

Ces conditions peuvent convenir pour les neuf dixièmes des usages du ciment, mais il est certains cas particuliers où elles demandent à être complétées ou modifiées.

On peut avoir besoin d'une prise rapide pour des travaux exécutés entre deux marées, ou encore pour la fabrication de tuyaux quand on ne dispose pas d'un nombre de moules suffisants ; il y aura lieu alors, au lieu de fixer une durée minima pour la prise, de fixer une durée maxima.

Pour les travaux à la mer il est nécessaire de compléter les conditions ci-dessus par des clauses relatives à la composition chimique : limitation de la teneur en alumine et en acide sulfurique, ou fixation d'un indice d'hydraulicité élevé.

Pour les enduits, pour la fabrication des carreaux, on pourra imposer certaines conditions de coloration, d'uniformité de teinte et, si l'on en connaissait un convenable, un essai pour se défendre contre le fendillement, dit en carte géographique.

Ce ne sont là que des cas exceptionnels, n'intéressant pas la grande majorité des consommateurs de ciment ; on emploie généralement pour ces usages des produits de fabrication spéciale que nous laissons de côté dans cette étude.

IV

Ce choix des essais de réception les plus convenables pour définir la qualité d'un ciment est relativement facile, mais la définition des conditions d'emploi de ces essais pour en tirer un parti réellement utile, constitue un problème beaucoup plus ardu ; la principale difficulté provient de l'essai de résistance. Ses résultats dépendent, en effet, en dehors de la qualité du ciment, d'un grand nombre de conditions différentes relatives au mode opératoire lui-même. Il faut maintenir toutes ces conditions identiques à elles-mêmes d'un essai à l'autre, si l'on veut pouvoir tirer une conclusion quelconque des résultats obtenus. Parmi ces conditions les unes sont aujourd'hui bien connues ; l'influence, par exemple, de la nature et de la proportion du sable, de la nature et de la proportion de l'eau, de la forme et des dimensions du moule, de la nature du milieu de conservation, de la température ambiante pendant toute la durée de durcissement, etc. ; il est possible de maintenir toutes ces conditions invariables, mais encore faut-il pour cela un laboratoire bien organisé, des bacs de conservation réglés à température invariable, un personnel expérimenté et consciencieux. D'autres conditions dépendent du travail de l'opérateur : manière de gâcher le mortier, de remplir le moule,

de lisser la surface des briquettes, etc., ne comportent aucune définition précise et l'on n'a pas réussi jusqu'ici à les régulariser. Des expériences comparatives faites à diverses reprises, tant en France qu'en Allemagne entre des laboratoires bien outillés ont toujours donné des divergences systématiques importantes. On a même signalé une fois deux opérateurs d'un même laboratoire, travaillant en apparence d'une façon identique et dont l'un obtenait des résistances doubles de l'autre ; il n'y a rien là qui doive surprendre, le même fait est bien connu dans la céramique, où des inégalités non définissables dans le moulage des pièces donnent lieu à des écarts énormes, d'un ouvrier à un autre, dans la proportion finale des déchets. Pour lever cette difficulté, la seule solution pratique aujourd'hui est de généraliser la mesure prise par l'administration des Ponts et Chaussées, de faire faire les essais définitifs de réception, au moins quand il s'agit de refuser une fourniture, par un laboratoire unique désigné à l'avance. On pourrait choisir celui de l'Ecole des Ponts et Chausséees, dont les méthodes de travail sont bien connues de tous les fabricants de ciment; plus tard, peut-être, le laboratoire du Conservatoire des Arts et Métiers, lorsque cet établissement sera arrivé à un régime stable de fonctionnement. Le seul point important est qu'il y ait en France un laboratoire unique chargé de la réception finale des ciments.

Le fonctionnement des essais de réception serait le suivant : les divers services du ministère des Travaux publics, du ministère de la Guerre, des Compagnies de chemins de fer et tous ceux qui disposent de laboratoires d'essais continueraient comme par le passé à faire eux-mêmes leurs essais de réception. Il est extrêmement utile que des essais soient faits directement par ceux qui emploient un produit, cela les amène à mieux connaître les matériaux mis en œuvre, à en découvrir parfois des défauts non encore soupçonnés ; cela les met à même d'en faire un meilleur emploi, enfin cela augmente leur considération et leur autorité auprès des industriels. Si le ciment est jugé bon, il est reçu directement par le service, rien n'est changé alors aux usages actuels. Si, au contraire, il est jugé mauvais, ou si, malgré un premier essai satisfaisant, le consommateur conserve des doutes, on procède à des prise d'essai contradictoires et on envoie un échantillon de chaque prise au laboratoire des Ponts et Chaussées. Cela peut facile-

ment se faire avant l'emploi du ciment puisque la durée totale d'une série d'essais ne dépasse pas 7 jours : les essais obtenus au laboratoire des Ponts et Chaussés font alors définitivement foi.

Dans le système actuel adopté par l'administration des Ponts et Chaussées, les choses ne se passent pas tout à fait ainsi, le recours au laboratoire de Paris n'est pas obligatoire avant tout refus ; les fabricants ont seulement le droit, s'ils le jugent à propos, d'y faire appel. Cette organisation est mauvaise et a donné lieu à quelques difficultés ; les chefs de service chargés de travaux importants et ayant en outre un laboratoire d'essais à leur disposition, n'ont généralement pas le temps d'en suivre de très près les travaux, ils sont d'ailleurs, le plus souvent, très peu au courant des conditions d'exactitude dans les essais ; aussi se formalisent-ils sans motifs, quand ils voient contester la valeur de leurs essais et demandent l'intervention du laboratoire de Paris ; une règle uniforme supprimerait ces froissements.

Avec un laboratoire unique le fabricant sera protégé contre les erreurs systématiques résultant de l'équation personnelle de tel ou tel laboratoire, mais il faut tenir compte aussi des erreurs accidentelles, et elles sont loin d'être négligeables. Il semble indispensable, pour remédier dans la mesure du possible à cet inconvénient, de faire au moins dans chaque fourniture incriminée six prises d'essai différentes et d'adopter comme résultat définitif de l'essai la moyenne des nombres relatifs à ces six échantillons; chacun d'eux est déjà, d'ailleurs, au moins pour l'essai de résistance, la moyenne de six chiffres relatifs à des briquettes différentes.

Ces diverses dispositions donneraient au fabricant le maximum de garantie possible à obtenir, mais à première vue le résultat semble être contraire pour le consommateur. Ce système complexe de contrôle serait bien difficile à mettre en branle en dehors de quelques administrations puissamment organisées; un petit entrepreneur ne pourrait pas y recourir : cette organisation des essais serait inexistante pour lui.

V

Il est indispensable, en effet de réaliser parallèlement une autre réforme de nature, celle-là, à donner toute garantie au consommateur, et tout particulièrement au petit consommateur, qui

n'en a aucune aujourd'hui et qui, en acceptant la mauvaise marchandise, entretient la mauvaise fabrication des usines. Il faudrait imposer aux fabricants de produits hydrauliques d'avoir parmi les produits de leurs usines et disponibles dans tous leurs dépôts, un certain nombre de marques *garanties*, c'est-à-dire de produits marqués par des plombs et des ficelles bien définis, pour lesquels ils donneraient certains chiffres de résistance, de durée de prise et d'invariabilité de volume, en garantissant d'une façon absolue les résultats annoncés, que le ciment ait été pris à l'usine ou dans un dépôt, par un particulier ou par une administration publique : si les conditions relatives aux essais à sept jours n'étaient pas remplies, le refus serait de droit avec toutes les conséquences habituelles pour réparer le préjudice causé au consommateur; une amende seulement pour le défaut de résistance à quatre-vingt-quatre jours. Le petit consommateur serait alors automatiquement protégé par les essais faits sur le même produit dans les administrations publiques.

Aujourd'hui les fabricants donnent dans leurs prospectus copie de beaux certificats d'essais faits sur leurs produits, mais sans rien garantir. Si un client se plaint d'avoir des résultats inférieurs, on lui répond, et cela est parfaitement légitime, qu'il s'agissait sur le certificat d'un échantillon isolé et que le hasard a pu être favorable ce jour-là à l'usine. Si ces chiffres sont donnés comme un résultat moyen de la fabrication, on explique avec non moins de raison que si tous les résultats étaient supérieurs à la moyenne, cette moyenne n'en serait plus une; le fait de trouver des résultats inférieurs est une confirmation de l'exactitude du chiffre donné comme moyenne.

Le mode de procéder recommandé ici aurait pour résultat de faire passer l'initiative des conditions de réception du consommateur au fabricant; cela est peut-être contraire à nos usages actuels, mais c'est cependant absolument logique. Cela se passe dans la fabrication de l'acier; le fabricant fait des aciers à telle ou telle résistance et le client choisit parmi eux ceux qui lui conviennent le mieux. Le consommateur, en effet, qui fixe à une usine à ciment un chiffre de résistance, n'a jamais besoin d'une façon absolue de ce chiffre plutôt que d'un chiffre voisin; il doit seulement viser à obtenir le maximum de qualité avec le minimum de dépense. Or en fait de fabrication de n'importe quelle

matière, du ciment comme des autres, les frais de fabrication croissent d'abord lentement avec la qualité pour s'emporter à un certain moment et tendre rapidement vers une asymptote infinie. Il y a dans chaque usine une certaine qualité limite possible que le fabricant connaît bien, mais que le consommateur ignore toujours. En fixant ses conditions de réception au hasard, comme il le fait nécessairement, il pourra les prendre trop douces et n'aura pas pour le prix payé toute la qualité possible : en les prenant trop dures il est certain de provoquer une surélévation exagérée des prix. Quand au contraire le fabricant fixe lui-même les conditions qu'il propose, il est conduit par la concurrence à offrir aux consommateurs la qualité la plus élevée qu'il puisse normalement fabriquer. Le rôle du consommateur doit se borner à indiquer les essais pour lesquels il exige un chiffre de garantie. Peut-être, en vue d'éviter une trop grande confusion, pourrait-il demander en outre que les écarts entre les qualités successives de divers produits de nature similaire correspondent à des chiffres de garantie suffisamment différents : par exemple, n'accepter pour les résistances à sept jours que la garantie des chiffres suivants : 0, 3, 6, 9, 12, 15 ou 18 kg.

Entre un ciment à 3 et un ciment à 4 kg., il n'y a pas de différence certaine, attendu que cet écart est inférieur à l'incertitude expérimentale des essais.

VI

Cette organisation du commerce des produits hydrauliques donnerait immédiatement la base d'une nomenclature rationnelle; on dirait un ciment à 3 kg., un ciment à 15 kg., comme on dit un acier à 35 kg., un acier à 80 kg. Si l'on voulait préciser davantage, on pourrait ajouter une autre indication relative à la rapidité de prise : un ciment à 3 kg. et 4 heures, un ciment à 15 kg. et 5 heures.

Il n'est pas nécessaire d'insister longuement pour faire comprendre les progrès à attendre d'une semblable réforme : elle obligerait en premier lieu les usines à homogénéiser leur fabrication, sans quoi elles seraient impuissantes à donner aucune garantie sérieuse : cette régularité, très avantageuse pour le consommateur, pourrait être obtenue à très peu de frais, peut-être même sans aucun frais dans la plupart des usines; elle dépend, en effet,

principalement d'une orientation particulière dans l'organisation générale du travail.

Une seconde conséquence non moins immédiate est que pour garantir quoi que ce soit, une usine devra commencer par faire l'essai de ces produits, et ces essais réguliers permettront, par contre-coup, de régulariser, c'est-à-dire d'améliorer la fabrication. Les différences très grandes de qualité entre les produits fabriqués par des usines différentes avec les mêmes matières, dépendent en général exclusivement du contrôle ou de l'absence de contrôle dans la fabrication.

Ces obligations nouvelles provoqueront certainement au premier moment des protestations d'un grand nombre de fabricants, mais en fin de compte elles leur seront aussi profitables qu'aux consommateurs. Il suffit de rappeler ce qui s'est passé lors de l'introduction d'essai d'invariabilité de volume : il devait porter un coup fatal à l'industrie des produits hydrauliques en France; or, tous les fabricants, aujourd'hui, sont d'accord pour reconnaître les services que leur a rendus cet essai, et c'est sur la demande de certains d'entre eux qu'il a été maintenu dans le nouveau cahier des charges du ministère des Travaux publics.

VII

Mais il ne suffit pas au consommateur d'avoir des produits de bonne qualité, il lui faut encore ne pas les payer trop cher. Sur ce point, les erreurs de certains consommateurs, des petits entrepreneurs, des maçons, dans les pays éloignés des usines de ciment, sont invraisemblables; ils ne se doutent pas de la valeur réelle du ciment et le payent bien des fois ce qu'ils devraient. C'est un obstacle très sérieux à la généralisation de son emploi dans les constructions civiles. Ces erreurs sont entretenues par certaines séries de prix officielles où l'on trouve des chiffres fantastiques; l'une d'elles donnait, il y a quelques années, elle le fait peut-être encore aujourd'hui, 120 francs la tonne pour le prix d'une chaux hydraulique provenant d'une usine qui n'existe plus d'ailleurs. Au détail le ciment arrive à se vendre, dans certaines régions, jusqu'à 500 francs la tonne, pris par kg., il est vrai. Le prix de 250 francs la tonne est tout à fait courant pour des achats relativement importants, s'élevant en une année jusqu'à 1.000 kilogrammes et plus : c'est dix fois la valeur normale du ciment pris à l'usine.

Il n'est pas possible d'indiquer de prix ferme pour les diverses qualités de ciment, parce que les conditions économiques varient d'une région à l'autre de la France; les carrières sont d'une exploitation plus ou moins facile, le prix du combustible croît rapidement à mesure que l'on s'éloigne des bassins houillers, le prix de la main-d'œuvre varie également, enfin et surtout la concurrence est plus ou moins active suivant le plus ou moins grand rapprochement des usines similaires.

On peut cependant indiquer quelques chiffres moyens, sinon possibles à obtenir dès à présent, auxquels du moins on arrivera certainement lorsque les progrès de la fabrication auront d'une part augmenté la concurrence et d'autre part diminué le prix de revient, ce qui est possible, et même facile à réaliser. Les indications données ici se rapportent à des livraisons faites par wagons complets, pris à l'usine.

On peut admettre qu'entre o et 20 kg. de résistance, le prix de revient croît en gros comme cette résistance : un ciment de résistance nulle, comme le sont un trop grand nombre de chaux hydrauliques actuelles, coûte déjà assez cher à fabriquer. Il faut abattre la pierre, la cuire, manutentionner la chaux dans l'usine et l'ensacher, payer les impôts, la location de l'usine; ces dépenses sont dans une large mesure indépendantes de la qualité finale du produit obtenu : on peut pour une usine d'importance moyenne les évaluer à 10 francs par tonne de produit fabriqué.

On ne peut guère aujourd'hui, même avec le ciment artificiel fabriqué au four tournant, garantir des résistances à sept jours sur mortier plastique supérieures à 20 kg. Un prix de vente de 30 francs la tonne n'est pas impossible, sans être cependant très rémunérateur. En réunissant ces deux chiffres de 10 francs et de 30 francs par une droite, on a pour le prix d'un ciment la formule très simple :

$$10 + R,$$

R étant la résistance en kg., par cm^2 sur mortier plastique à sept jours. Il ne faudrait pas compter obtenir aujourd'hui ces prix d'une façon générale, ce sont des prix d'avenir. En multipliant le chiffre de résistance R par 1,5 on aurait, au contraire des prix immédiatement acceptables par toutes les usines *capables de fabriquer*, supérieurs même à la généralité des prix actuels. Ces deux formules donnent les limites extrêmes entre lesquelles peut évoluer le prix du ciment.

L'application de ces formules soulèverait certainement les protestations énergiques de fabricants de chaux hydrauliques à résistance nulle, car elle leur attribue un bénéfice également nul. Il n'y a pas à s'en préoccuper, c'est tout ce que méritent ces produits; on doit chercher systématiquement à les étrangler. Il n'y a pas, en effet, d'usine en France, qui ne puisse, avec une fabrication même médiocre, donner 3 kg. à sept jours. Si par hasard il y en avait une, il faudrait l'engager à fermer sa carrière et à en chercher une moins mauvaise, qui ne serait pas difficile à trouver.

Si l'on admet la combinaison recommandée plus haut d'avoir un essai à 84 jours, donnant seulement lieu à une amende en cas d'insuffisance, on pourrait fixer cette amende à 1 franc par kg. en dessous du chiffre garanti.

VIII

Il faut bien comprendre que les progrès escomptés ici dans la fabrication des produits hydrauliques, ne pourront pas être réalisés du jour au lendemain, mais ils le seront plus ou moins vite selon les exigences du consommateur; une intelligente insistance de leur part pourra les accélérer beaucoup. Ils sont subordonnés en effet à une évolution de cette industrie, analogue à celle qui s'est produite dans l'industrie du fer, c'est-à-dire, à la disparition des petites usines isolées exploitées par leurs propriétaires devant de plus puissants établissements diposant d'un personnel technique indispensable. On ne peut pas demander à un cafetier, ou à un cultivateur dépourvu de toute instruction, de suivre sa fabrication en s'aidant d'essais scientifiques. En disant que toutes les usines à chaux peuvent fournir couramment des résistances de 3 kg. à sept jours, on sous-entend, avec un directeur sachant ce qu'est la fabrication de la chaux.

ARRÊTÉ MINISTÉRIEL DU 2 JUIN 1902

CONCERNANT LES FOURNITURES DE CIMENT ET DE CHAUX HYDRAULIQUES

Article premier. — *Dispositions générales.* — Toutes les fournitures de ciments et de chaux relatives à l'exécution des travaux dépendant de l'Administration des Travaux publics, qu'il s'agisse de marchés pour fourniture sans emploi ou de marchés de tra-

vaux comprenant la fourniture et l'emploi, sont soumises, en tout ce qui leur est applicable, aux dispositions suivantes :

TITRE PREMIER

CLAUSES APPLICABLES A TOUS LES MARCHÉS

Art. 2. — *Mode de livraison.* — Le ciment et la chaux lorsqu'elle sera fournie en poudre seront livrés en sacs ou en barils.

Les sacs renfermeront un poids net de 50 kg.; ils seront cousus en dedans et fermés par un scellement au plomb à la marque du fabricant et d'un modèle accepté par l'Administration.

Les barils porteront sur l'un des fonds la marque de fabrique et sur l'autre l'indication du poids net de ciment ou de chaux qu'ils renfermeront.

Les sacs et barils devront être en parfait état au moment de la livraison. Tout ciment ou chaux humide sera rejeté.

A l'arrivée de chaque expédition, les connaissements ou lettres de voitures seront communiqués à l'Ingénieur.

Art. 3. — *Emmagasinage.* — Les sacs ou barils de ciment ou de chaux seront conservés dans des magasins très secs, clos et couverts. Ils y seront déposés par tas distincts correspondant à chaque livraison.

L'entrepreneur aura la garde et la responsabilité des ciments et des chaux en magasin jusqu'au moment de l'emploi, sauf l'exception stipulée à l'article 17.

Tout sac ou baril de ciment ou de chaux qui se trouvera avarié ou dont les enveloppes ne seront pas en bon état au moment de la délivrance pour emploi sera rebuté.

Art. 4. — *Epreuves.* — Aucun ciment et aucune chaux ne pourront être employés avant d'avoir été soumis aux épreuves prescrites par le cahier des charges spécial de l'entreprise et reçus provisoirement.

L'ingénieur aura le droit de refaire, pendant toute la durée du séjour en magasin des chaux et ciments reçus provisoirement, les épreuves prescrites par le cahier des charges spécial de l'entreprise, et de rebuter les lots qui ne satisferaient plus, au moment de la délivrance pour emploi ou de la réception définitive, aux conditions exigées pour ces épreuves.

Lorsque les épreuves auront donné des résultats défavorables,

l'entrepreneur pourra demander qu'on les recommence au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées.

Art. 5. — *Prélèvement des échantillons.* — Les échantillons à soumettre aux épreuves seront prélevés, en des profondeurs et des points différents, dans plusieurs sacs, barils ou tas désignés par l'ingénieur. Les ciments ou les chaux provenant de prélèvements différents ne devront pas être mélangés.

Art. 6. — *Qualité.* — Le ciment ou la chaux seront de composition et de qualité constantes; ils ne contiendront ni incuits, ni matières étrangères.

Art. 7. — *Finesse de mouture ou de blutage.* — Les essais porteront sur un échantillon de 100 gr. Le tamisage sera effectué au moyen de tamis de 324, 900 ou 4.900 mailles par cm²; les fils de ces trois tamis auront des grosseurs respectives de vingt, quinze ou cinq centièmes de millimètre.

Art. 8. — *Densité apparente.* — La densité apparente sera déterminée en versant doucement le ciment ou la chaux, sans les faire tasser, dans une mesure métallique de forme cylindrique ayant un litre de capacité et 10 centimètres de hauteur.

Le ciment ou la chaux contenus dans la mesure seront pesés. On prendra pour la densité apparente la moyenne des poids constatés dans trois opérations successives.

En cas de contestation, on recourra pour le remplissage de la mesure à l'emploi d'un entonnoir à tamis en tôle perforée de trous de 2 millimètres : on placera cet entonnoir de manière que l'extrémité de son ajutage inférieur soit à 5 centimètres au-dessus de la mesure. On versera le ciment ou la chaux en évitant tout choc et toute trépidation. Quand la mesure débordera, on enlèvera la matière en excès en faisant glisser sur son bord supérieur une lame tenue dans un plan vertical.

Art. 9. — *Durée de prise.* — Le ciment ou la chaux seront gâchés à l'eau potable en pâte ferme et seront disposés sous forme de gâteau de 4 centimètres d'épaisseur environ immédiatement immergé soit dans l'eau potable, soit dans l'eau de mer, suivant ce qui sera prescrit par le cahier des charges spécial de l'entreprise. Le ciment ou la chaux, l'eau de gâchage et le bain d'immersion seront à la température d'au moins 15° centigrades quand il s'agira de déterminer un maximum de rapidité de prise et d'au plus 15° quand il s'agira d'un minimum.

On appellera début de la prise l'instant à partir duquel l'aiguille Vicat ayant une section d'un mm² et pesant 300 gr. ne peut plus traverser tout le gâteau.

On appellera fin de la prise l'instant à partir duquel la surface de la pâte peut supporter la même aiguille sans qu'elle y pénètre d'une quantité appréciable, telle qu'un dixième de millimètre.

En cas de contestation, on considérera comme pâte ferme de ciment ou de chaux celle qui, gâchée à raison de cinq minutes par kg., puis placée dans une boîte de 4 cm. de profondeur, sera traversée jusqu'à 6 mm. du fond de cette boîte par une sonde de consistance d'un cm. de diamètre et du poids de 300 gr.

Art. 10. — *Résistance à la traction.* — Les essais de résistance pourront porter sur la pâte ferme de ciment ou de chaux pure et sur le mortier plastique de ciment ou de chaux gâché à l'eau potable. Ils seront faits à l'aide d'éprouvettes en forme de 8 ayant une section au milieu de 5 cm².

Les moules servant à faire les éprouvettes seront remplis en une seule fois; on les agitera d'abord pour expulser les bulles d'air; la pâte ou le mortier sera ensuite comprimé à la truelle mais non damé; puis, avec le tranchant de celle-ci, on enlèvera l'excédent qui dépassera les bords du moule et on lissera la surface.

Chaque essai comportera la rupture de six éprouvettes. On prendra pour la résistance à la traction la moyenne des quatre résultats les plus forts.

Le mortier sera dosé en poids à raison d'une partie de ciment ou de chaux pour trois de sable desséché. Le sable sera composé par parties égales de grains de trois grosseurs séparés par les quatre tamis en tôle perforée de trous de $\frac{1}{2}$, 1, 1 $\frac{1}{2}$ et 2 mm. de diamètre.

Les éprouvettes, après avoir été conservées dans une atmosphère humide et à l'abri des courants d'air et du soleil pendant un temps dont la durée sera fixée par le cahier des charges spéciale de l'entreprise, seront démoulées et immergées dans l'eau potable ou l'eau de mer, suivant ce qui aura été prescrit par ce cahier des charges. En tout cas, l'eau sera renouvelée tous les sept jours.

En cas de contestation, on considérera comme pâte ferme de ciment ou de chaux pure, celle qui est définie à l'article 9 et comme mortier plastique de ciment ou de chaux, un mortier confectionné au moyen de sable de la plage de Leucate fourni par l'Adminis-

tration et gâché avec une quantité d'eau égale pour un kg. de matière à 70 gr. + $\frac{6}{1}$ P ; P étant le poids d'eau nécessaire pour transformer un kg. de ciment ou de chaux en pâte ferme.

Art. 11. — *Déformations à froid et à chaud.* — Les essais de déformation à froid seront faits avec des galettes de ciment ou de chaux gâchées avec de l'eau potable en pâte ferme. Les galettes, ayant environ 10 cm. de diamètre et 2 cm. d'épaisseur, seront amincies sur les bords et disposées sur des plaques de verre. Les galettes seront immergées dans les conditions que fixera le cahier des charges spécial de l'entreprise et conservées dans l'eau jusqu'à la réception définitive des ciments ou des chaux.

Aucune des galettes ne devra présenter la moindre trace de gonflement, saillie ou boursouflement. Les bords des galettes devront rester bien appliqués au verre et ne se relever en aucun point.

Les essais de déformation à chaud se feront sur des éprouvettes cylindriques d'un diamètre et d'une hauteur de 30 mm. moulées dans un tube en laiton de $\frac{1}{2}$ cm. d'épaisseur, fendu suivant une génératrice et portant, soudée de chaque côté de la fente, une aiguille de 150 mm. de longueur.

Dans les 24 heures qui suivront l'achèvement de la prise, ces éprouvettes seront immergées dans l'eau, qui sera progressivement élevée à la température fixée par le cahier des charges et maintenue à cette température pendant le temps également fixé par le cahier des charges, puis refroidie jusqu'à la température initiale. L'augmentation d'écartement des pointes des aiguilles ne devra pas dépasser les chiffres indiqués au cahier des charges spécial de l'entreprise.

Aucune des galettes et éprouvettes ne devra présenter la moindre trace de gonflements ni de déformations, telles que fendillements, saillies, boursouflements. Les bords des galettes devront rester bien appliqués au verre et ne se relever en aucun point.

Art. 12. — *Constance de la température.* — L'eau dans laquelle les éprouvettes et galettes seront conservées devra être maintenue à des températures comprises entre 12 et 18° centigrades.

Art. 13. — *Enlèvement du ciment et de la chaux rebutés.* — Le ciment ou la chaux rebutés seront enlevés des magasins par les soins et aux frais de l'entrepreneur dans un délai de 10 jours à dater de la notification du procès-verbal de rebut.

Faute par l'entrepreneur de se conformer à cette prescription, il sera procédé d'office par l'Ingénieur à l'enlèvement du ciment ou de la chaux rebutés, et ce ciment ou cette chaux seront transportés et déposés aux frais, risques et périls de l'entrepreneur dans des magasins loués à son compte.

TITRE II

CLAUSES APPLICABLES AUX MARCHÉS POUR FOURNITURE SANS EMPLOI

Art. 14. — *Commandes.* — Le ciment ou la chaux seront fournis par lots successifs dont l'importance et les délais de livraison seront fixés par des ordres de service. Le cahier des charges spécial de l'entreprise déterminera la quantité maxima de ciment ou de chaux qui pourra être demandée mensuellement à l'entrepreneur ainsi que la durée minima du délai accordé pour l'exécution de chaque commande.

En cas de retard dans la livraison, l'Administration pourra, 10 jours après la notification à l'entrepreneur d'une mise en demeure de l'Ingénieur, acheter d'office et à ses frais les quantités de ciment ou de chaux qui n'auraient pas été livrées.

Si le ciment ou la chaux fournis donnent lieu à un procès-verbal de rebut et que l'entrepreneur, mis en demeure, n'ait pas remplacé dans un délai qui sera fixé par l'Ingénieur et qui sera d'au moins 10 jours, le ciment ou la chaux rebutés, l'Administration pourra également acheter d'office et aux frais de l'entrepreneur une quantité de ciment ou de chaux égale à celle qui aura été rebutée.

Dans les deux cas, le montant de l'entreprise sera diminué d'autant, sans que l'entrepreneur puisse invoquer le bénéfice de l'article 31 des clauses et conditions générales.

Art. 15. — *Restitution des enveloppes.* — Les sacs vides seront réintégrés en magasin à la diligence de l'Administration au fur et à mesure de l'emploi et tenus à la disposition de l'entrepreneur, qui devra les enlever à ses frais.

A défaut d'enlèvement dans le délai fixé par l'Ingénieur et en cas d'encombrement des magasins, les sacs vides seront retournés d'office à l'entrepreneur, à son adresse et à ses frais.

La valeur de sacs non rendus sera payée à l'entrepreneur, en fin d'entreprise, au prix fixé par le cahier des charges de l'entreprise, sans déduction du rabais de l'adjudication.

Les barils vides resteront la propriété de l'Etat.

Art. 16. — *Pesage.* — Tous les sacs ou barils seront pesés contradictoirement au moment de l'entrée en magasin.

On déterminera le poids de la tare en pesant un nombre d'enveloppes égal à 10 % environ du nombre total.

Art. 17. — *Réception.* — La réception provisoire de chaque lot de fourniture sera prononcée dès que le ciment ou la chaux composant ce lot auront satisfait aux épreuves fixées par le cahier des charges de l'entreprise.

Le ciment ou la chaux reçus provisoirement seront portés en compte comme approvisionnements jusqu'à la délivrance pour emploi.

Le ciment ou la chaux qui n'auront pas été employés dans un délai de six mois à dater de la réception provisoire seront portés en travaux terminés à l'expiration du délai de six mois s'ils satisfont à toutes les conditions prescrites, et l'entrepreneur sera, à partir de ce moment, déchargé de toute responsabilité pour la garde et la conservation en magasins.

Art. 18. — *Délai de garantie.* — Le délai de garantie sera d'un an à dater de la réception provisoire de la dernière fourniture partielle.

Paris, le 2 juin 1902.

Le Ministre des Travaux publics,

Pierre BAUDIN.

CAHIER DES CHARGES, TYPE N° 1

Pour les fournitures de ciment Portland destinées à des travaux en prise à la mer. (Circulaire du 2 juin 1902)

Article Premier. — *Définition du produit.* — Le ciment Portland sera produit par la mouture d'un mélange intime de carbonate de chaux, silice, alumine et fer cuit jusqu'à ramollissement.

Art. 2. — *Provenance et contrôle à l'usine.* — Le ciment proviendra directement et exclusivement d (1).

(1) S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine du ciment, de l'une des usines ci-après.....

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine du ciment : de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur.

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition du ciment qui sera fourni en exécution du présent marché.

Elle pourra y installer des agents spéciaux en permanence.

Art. 3. — *Mode de livraison.* — Le ciment sera livré (en sacs ou en barils).

Art. 4. — *Composition chimique.* — Le ciment ne devra pas contenir plus de 1,5 % d'acide sulfurique, ni plus de 2 % de magnésie, ni plus de 8 % d'alumine, ni des sulfures en proportions dosables.

Son indice d'hydraulicité, c'est-à-dire le rapport entre les poids de la silice combinée et de l'alumine, d'une part, et le poids de la chaux et de la magnésie, d'autre part, sera au moins de 0,47, pour une teneur en alumine de 8 %, avec une diminution de 0,02 pour chaque 1 % d'alumine en dessous de 8.

Art. 5. — *Finesse de mouture.* — Le ciment devra laisser au moins 40 % de son poids sur le tamis de 4.900 mailles par cm² et au plus 2 % sur le tamis de 324 mailles.

Art. 6. — *Densité apparente.* — Le poids du litre de ciment sera de 1.200 grammes au moins.

Art. 7. — *Durée de prise.* — Le ciment immergé dans l'eau potable ne devra pas commencer à faire prise avant un délai de vingt minutes. La prise devra être complètement terminée dans un délai qui ne sera pas inférieur à trois heures ni supérieur à douze heures.

Art. 8. — *Résistance à la traction du ciment pur.* — Les éprouvettes de ciment pur, immergées dans l'eau de mer au bout de vingt-quatre heures, devront présenter une résistance à la traction par cm² qui sera au moins de :

15 kilogrammes au bout de	7 jours	
30 » »	28	(1)

La résistance devra augmenter d'ailleurs au moins de 2 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

Art. 9. — *Résistance à la traction du mortier de ciment.* — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau de mer au bout de

(1) Les chiffres ci-dessus sont des minima ; les ingénieurs pourront les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiquent.

vingt-quatre heures, devront présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui sera au moins de :

3 kilogrammes au bout de.............. 7 jours
6 » » 28 (1)

La résistance devra d'ailleurs augmenter au moins de 2 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

Art. 10. — *Déformations à froid et à chaud.* — Les galettes et éprouvettes seront conservées dans une atmosphère humide pendant vingt-quatre heures ; les galettes seront ensuite immergées dans l'eau de mer. La température de l'essai de déformation à chaud des éprouvettes sera de 100° ; elle sera maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne devra pas dépasser 5 millimètres.

CAHIER DES CHARGES, TYPE N° 2

POUR LA FOURNITURE DE CHAUX HYDRAULIQUE DESTINÉE A DES TRAVAUX EN PRISE A LA MER (Circulaire du 2 juin 1902)

Article Premier. — *Définition du produit.* — La chaux sera livrée en poudre fine, sans incuits, ni matières étrangères.

Art. 2. — *Provenance et contrôle à l'usine.* — La chaux proviendra directement et exclusivement de (2).

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition de la chaux qui sera fournie en exécution du présent marché.

Elle pourra y installer des agents spéciaux en permanence.

Art. 3. — *Mode de livraison.* — La chaux sera livrée en sacs ou en barils.

(1) Même observation qu'à l'article 8.

(2) S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine de la chaux : de l'une des usines ci-après... ou d'autres fournissant couramment des produits d'une qualité que les ingénieurs reconnaissent au moins égale.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine de la chaux : d'une usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur.

Art. 4. — *Composition chimique.* — La chaux devra contenir moins de 2 % d'alumine, plus de 20 % de silice combinée et ne pas perdre plus de 10 % de son poids par la calcination au rouge blanc.

Ces chiffres ne seront pas obligatoires pour les chaux qui auront subi avec succès les essais à la mer effectués par la Commission des Chaux et ciments sur la demande des fabricants désireux de présenter leurs produits aux adjudications de travaux à la mer.

Art. 5. — *Finesse de mouture.* — La chaux devra laisser au plus 5 % de son poids sur le tamis de 900 mailles par cm² et 2 % sur le tamis de 324 mailles.

Art. 6. — *Densité apparente.* — Le poids du litre de chaux devra être supérieur à 700 gr.; pour la chaux provenant d'une même usine, la variation du poids du litre ne pourra dépasser 100 gr.

Art. 7. — *Durée de prise.* — La pâte de chaux immergée dans l'eau de mer devra avoir commencé à faire prise dans un délai de six heures et avoir fait complètment prise dans un délai de 30 heures au plus.

Art. 8. — *Résistance à la traction du mortier de chaux.* — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau de mer au bout de 24 heures, devront présenter une résistance à la traction par cm² qui sera au moins de :

3 kilogrammes	au bout de	....	7 jours	
6	»	»	28	(1)

La résistance devra augmenter d'ailleurs au moins de 2 kg. du septième au vingt-huitième jour.

Art. 9. — *Déformations à froid et à chaud.* — Les galettes et éprouvettes seront conservées dans une atmosphère humide pendant 48 heures. Ensuite on immergera les galettes dans de l'eau de mer. La température de l'essai de déformation à chaud des éprouvettes sera de 100° et sera maintenue pendant 3 heures.

L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne devra pas dépasser 5 mm.

(1) Les chiffres ci-dessus sont des minima. Les ingénieurs pourront les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiqueront.

CAHIER DES CHARGES, TYPE N° 3

POUR LES FOURNITURES DE CIMENTS PORTLAND DESTINÉES A DES TRAVAUX NON EN PRISE A LA MER. — (Circulaire du 2 juin 1902)

ARTICLE PREMIER. — *Définition du produit.* — Le ciment Portland sera produit par la mouture d'un mélange intime de carbonate de chaux, silice, alumine et fer cuit jusqu'à ramollissement.

ART. 2. — *Provenance et contrôle à l'usine.* — Le ciment proviendra directement et exclusivement d (1).

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition du ciment qui sera fourni en exécution du présent marché.

Elle pourra y installer des agents spéciaux en permanence.

ART. 3. — *Mode de livraison.* — Le ciment sera livré en sacs ou en barils.

ART. 4. — *Composition chimique.* — Le ciment ne devra pas contenir plus de 3 % d'acide sulfurique ni plus de 5 % de magnésie, ni plus de 10 % d'alumine, ni des sulfures en proportions dosables.

ART. 5. — *Finesse de mouture.* — Le ciment devra laisser au plus 30 % de son poids sur le tamis de 4.900 mailles par cm² et 10 % sur le tamis de 900 mailles.

ART. 6. — *Densité apparente.* — Le poids du litre de ciment sera de 1.100 gr. au moins.

ART. 7. — *Durée de prise.* — Le ciment immergé dans de l'eau potable ne devra pas commencer à faire prise avant un délai de 20 minutes.

La prise devra être complètement terminée dans un délai qui ne sera pas inférieur à 2 heures ni supérieur à 12 heures.

---

(1) S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine du ciment : de l'une des usines ci-après... ou d'autres fournissant couramment des produits d'une qualité que les ingénieurs reconnaissent au moins égale.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine du ciment : de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur.

Art. 8. — *Résistance à la traction du ciment pur.* — Les éprouvettes de ciment pur, immergées dans de l'eau potable au bout de 24 heures, devront présenter une résistance à la traction par cm^2 qui sera au moins de

25 kilogrammes au bout de	7 jours	
35 » »	28	(1)

La résistance devra augmenter d'ailleurs au moins de 3 kg. du septième au vingt-huitième jour.

Art. 9. — *Résistance à la traction du mortier de ciment.* — Les éprouvettes de mortier, immergées dans de l'eau potable au bout de vingt-quatre heures, devront présenter une résistance à la traction par cm^2 qui sera au moins de

8 kilogrammes au bout de	7 jours	
15 » »	28	(2)

La résistance devra augmenter d'ailleurs au moins de 2 kg. du septième au vingt-huitième jour.

Art. 10. — *Déformations à chaud.* — Les éprouvettes seront conservées dans une atmosphère humide pendant vingt-quatre heures. La température de l'essai sera de 100° et sera maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne pourra dépasser 10 mm.

CAHIER DES CHARGES, TYPE N° 4

POUR LES FOURNITURES DE CIMENTS DE GRAPPIERS. — (Circulaire du 2 juin 1902)

Article Premier. — *Définition du produit.* — Le ciment de grappiers sera produit par la mouture des grappiers formant le résidu de la fabrication des chaux bien cuites, séparés de ces dernières par des extinctions et des blutages successifs.

Art. 2. — *Provenance et contrôle à l'usine.* — Le ciment proviendra directement et exclusivement d (3).

(1) Les chiffres ci-dessus sont des minima. Les ingénieurs pourront les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiqueront.

(2) Même observation.

(3) S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition du ciment qui sera fourni en exécution du présent marché.

Elle pourra y installer des agents spéciaux en permanence.

Art. 3. — *Mode de livraison.* — Le ciment sera livré (en sacs ou en barils).

Art. 4. — Le ciment ne devra pas contenir plus de 1,5 % d'acide sulfurique, ni plus de 5 % de magnésie, ni moins de 22 % de silice combinée. Si le ciment est destiné à des travaux en prise à la mer, on stipulera, en outre, qu'il ne devra pas contenir plus de 3 % d'alumine.

Ces chiffres ne seront pas obligatoires pour les ciments qui auront subi avec succès les essais effectués par la Commission des chaux et ciments sur la demande des fabricants désireux de présenter leurs produits aux adjudications de travaux publics.

Art. 5. — *Finesse de mouture.* — Le ciment devra laisser au plus 30 % de son poids sur le tamis de 4.900 mailles par cm² et 10 % sur le tamis de 900.

Art. 6. — *Durée de prise.* — Le ciment immergé dans de l'eau potable devra avoir commencé à faire prise dans un délai de cinq heures et avoir fait complètement prise dans un délai de quatorze heures.

Art. 7. — *Résistance à la traction du mortier de ciment.* — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau potable au bout de vingt-quatre heures, devront présenter une résistance à la traction par cm² qui sera au moins de

8 kilogrammes au bout de............... 7 jours
12 » » 28 (1)

Si le ciment est destiné à des travaux en prise à la mer les résistances exigées à sept et à vingt-huit jours seront portées respectivement à 10 et à 15 kg. La résistance devra d'ailleurs augmenter du septième au vingt-huitième jour.

---

l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine du ciment : de l'une des usines ci-après...

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine du ciment : de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur.

(1) Les chiffres ci-dessus sont des minima. Les ingénieurs pourront les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiqueront.

Art. 8. — *Déformations à froid et à chaud.* — Les galettes et éprouvettes seront conservées dans une atmosphère humide pendant vingt-quatre heures.

Ensuite, on immergera les galettes dans l'eau de mer pour les travaux en prise à la mer. La température de l'essai de déformation à chaud des éprouvettes sera de 100° et sera maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne devra pas dépasser 5 mm. pour les travaux à la mer et 10 mm. pour les autres travaux.

CIRCULAIRE MINISTÉRIELLE DU 9 NOVEMBRE 1909

RELATIVE AUX FOURNITURES DE CIMENTS ET CHAUX HYDRAULIQUES

L'arrêté ministériel du 2 juin 1902, modifié le 20 novembre 1904, qui a fixé les dipositions générales applicables à toutes les fournitures de ciments et de chaux hydrauliques, était accompagné de cinq cahiers des charges-types relatifs :

1° Aux ciments de Portland pour travaux à la mer;

2° Aux chaux hydrauliques pour travaux à la mer;

3° Aux ciments Portland pour travaux non exposés à la mer;

4° Aux ciments de grappiers;

5° Aux ciments et chaux ne rentrant pas dans les catégories précédentes.

Le cahier des charges n° 5 avait le caractère d'un passe-partout dont les ingénieurs devaient remplir les blancs en fixant eux-mêmes les données numériques à réaliser. L'expérience a montré que son interprétation et son usage donnaient lieu à des inconvénients en ce qui concerne les fournitures de chaux hydrauliques destinées à des travaux non en prise à la mer. Certains ingénieurs sont tentés de remplir les blancs avec des chiffres empruntés au cahier des charges-type n° 2, ou bien ils hésitent à admettre des chaux qu'ils ne connaissent pas, et ils continuent parfois à porter dans certains devis et cahiers des charges la désignation de marques particulières.

Mon attention a été appelée sur ce point par la Chambre syndicale des fabricants de chaux, qui m'a demandé de préciser les conditions exigées pour les fournitures de chaux hydrauliques destinées aux travaux non en prise à la mer en faisant élaborer un ou plusieurs cahiers des charges-types n° 5.

J'ai chargé la commission des chaux et ciments d'étudier la question et sur son avis, après examen en conseil général des Ponts et Chaussées, j'ai adopté un nouveau cahier des charges-type ci-annexé qui portera le n° 6 et devra être appliqué aux fournitures de chaux hydraulique de 1re catégorie destinée à tous les travaux non en prise à la mer de quelque importance.

Toutefois, pour l'emploi au contact d'eaux sulfatées ou d'une manière générale chargées de sels susceptibles d'amener la décomposition des mortiers, les ingénieurs devront demander, par exception, l'application du cahier des charges-type n° 2, relatif aux chaux hydrauliques destinées aux travaux en prise à la mer.

Chaux de 1re catégorie. — Le cahier des charges type n° 6 a été rédigé dans l'esprit le plus large ; les conditions exigées ont été réduites dans toute la mesure du possible, afin d'ouvrir l'accès des chantiers de l'Administration des Travaux publics à tous les produits offrant des garanties.

On a supprimé toute clause relative à la densité, à la fin de prise, à la résistance, à la traction de la pâte de chaux ferme, et à la composition chimique. Sur ce dernier point, l'article 2 stipule seulement, pour éviter les mélanges de provenance et pour pouvoir, en cas d'avaries, mieux établir les responsabilités, que chaque livraison proviendra toujours d'une seule et même usine.

L'article 3 porte que le scellement au plomb, qui fermera les sacs contenant le produit, en garantira la qualité de telle sorte que la fabrication ait sa responsabilité engagée si la chaux livrée sous plomb défini par le même article et portant la marque (hydraulique, 1re catégorie, n° 6) ne remplit pas les conditions exigées par le cahier des charges.

L'article 7 prévoit que l'essai de déformation à chaud sera fait à la température de 100°, par analogie avec les clauses des quatre premiers cahiers des charges-type du 2 juin 1902 et en raison de la difficulté de réaliser la constance de la température de 50° prévue par le cahier des charges-type n° 5. La durée de l'essai a d'ailleurs été réduite en conséquence et l'écartement admis a été augmenté.

Chaux de 2e catégorie. — Quelque larges que soient les conditions du cahier des charges-type n° 6, son emploi exclusif éliminerait certains produits locaux, qui peuvent trouver, en attendant l'amélioration souhaitable de leurs conditions de fabrication, un

emploi partiel et limité dans des ouvrages d'importance secondaire et dont l'exécution n'exige pas de précautions spéciales. Il serait difficile d'astreindre ces produits, dont l'emploi a été admis par diverses circulaires antérieures, à un cahier des charges en forme qui ne saurait en toute hypothèse rentrer dans le cadre prévu par l'arrêté du 2 juin 1902. Il a paru, en revanche, possible et il semble suffisant de donner sur la livraison et la recette de ces produits qui constitueront une deuxième catégorie les quelques indications qui suivent ; les chaux ne satisfaisant pas à ce minimum de qualité ne sauraient être considérées comme hydrauliques :

a) La chaux devra être livrée en poudre fine, sans grains ni grumeaux, et être contenue dans des sacs renfermant un poids net de 25 ou de 50 kg. ;

b) La chaux gâchée en pâte ferme, coulée dans un moule d'au moins 4 cm. de profondeur, recouverte par un verre appliqué de façon à faire déborder l'excès de chaux et immergée de suite dans l'eau potable, devra, après sept jours de conservation, pouvoir supporter une pression énergique du pouce sans montrer d'enfoncement appréciable ;

c) La même éprouvette sortie de son moule, immergée dans l'eau potable chauffée à 100° et maintenue pendant trois heures à cette température, ne devra présenter ni désagrégation, ni gonflements notables.

Ces indications, dont les ingénieurs pourront tirer parti, le cas échéant, paraissent suffisantes pour compléter la réglementation générale de l'emploi des chaux hydrauliques destinées aux travaux non en prise à la mer sur les chantiers de l'Administration des Travaux publics.

Cette réglementation doit être accompagnée d'une modification du deuxième alinéa à l'article 2 de l'arrêté ministériel du 2 juin 1902, qui sera rédigé dorénavant comme suit :

« Les sacs renfermeront un poids net de 25 ou 50 kg. ; ils seront cousus en dedans et fermés par un scellement au plomb à la marque du fabricant et d'un modèle accepté par l'Administration. »

L'ancienne rédaction applicable, en général, à toutes les fournitures de ciments et de chaux prévoyait, en effet, que les sacs devaient renfermer un poids net de 50 kg., ainsi qu'il est d'usage

pour les ciments, alors qu'en pratique les chaux sont livrées en sacs de 25 kg. au plus. Le nouvelle rédaction plus générale s'applique mieux à toutes les fournitures de chaux et ciments régies par l'arrêté du 2 juin 1902.

Diverses usines, dont les produits ne répondent pas actuellement aux exigences du cahier des charges-type n° 6, désireront probablement améliorer leur fabrication et surtout leur extinction, de manière à faire classer ces produits dans la première catégorie des chaux hydrauliques. Pour leur permettre de réaliser ces améliorations et ménager ainsi la transition entre le régime en vigueur et la réglementation nouvelle, j'ai décidé que celle-ci n'entrerait en application qu'au 1er janvier 1911.

En résumé et comme suite à la circulaire du 2 juin 1902, je vous invite à insérer, à partir du 1er janvier 1911, dans tous les devis et cahiers des charges, des projets comportant l'emploi de chaux hydrauliques de première catégorie destinées aux travaux non en prise à la mer :

A. Un article indiquant que les fournitures de chaux en question devront satisfaire aux conditions générales fixées par l'arrêté ministériel du 2 juin 1902 modifié comme il est dit ci-dessus ;

B. Une série d'articles qui seront la reproduction du cahier des charges-type n° 6.

Le cahier des charges-type n° 5 ne devra plus être employé à l'avenir pour les fournitures de chaux hydrauliques. Celles qui ne seront effectuées ni sous le régime du cahier des charges-type n° 2 applicable aux travaux en prise à la mer ou aux eaux sulfatées, ni sous le régime du cahier des charges-type n° 6, c'est-à-dire celles destinées à permettre l'usage des produits locaux à des travaux secondaires, devront satisfaire au minimum de qualité indiqué aux paragraphes *a*, *b* et *c* ci-dessus.

Je rappelle, en terminant, que les essais nécessaires à l'exacte application du cahier des charges-type n° 6 pourront être demandés, le cas échéant, au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées.

Je vous prie de m'accuser réception de la présente circulaire.

Le Ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes.

A. MILLERAND.

ANNEXE A LA CIRCULAIRE DU 9 NOVEMBRE 1909

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 6

Pour la fourniture de chaux hydrauliques destinées à des travaux non en prise à la mer (1re catégorie).

Article Premier. — *Mode de livraison.* — La chaux sera livrée en poudre et renfermée dans des sacs; le scellement au plomb qui les fermera en garantira la qualité, et portera la marque : « hydraulique, 1re catégorie, n° 6 ».

Art. 2. — *Provenance.* — La chaux d'une livraison proviendra toujours d'une seule et même usine.

Art. 3. — *Finesse de mouture.* — La chaux devra laisser au plus 5 % de son poids sur le tamis de 900 mailles par cm^2 et 25 % sur le tamis de 4.900 mailles.

Art. 4. — *Durée de prise sous l'eau.* — La pâte de chaux immergée dans l'eau potable devra avoir commencé à faire prise avant douze heures.

Art. 5. — *Résistance à la traction du mortier de chaux.* — Les éprouvettes de mortier démoulées au bout de vingt-quatre heures, puis immergées dans l'eau potable au bout de quarante-huit heures, devront présenter une résistance à la traction par cm^2 qui sera au moins de :

2 kg au bout de 7 jours ;

6 kg au bout de 28 jours.

Art. 6. — *Déformation à chaud.* — Les éprouvettes cylindriques seront conservées dans une atmosphère humide pendant quarante-huit heures, puis immergées dans l'eau potable. L'essai de déformation à chaud sera effectué quatre jours après le gâchage. La température à l'essai sera de 100°, elle sera maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne devra pas dépasser 10 mm.

Toute chaux qui aura gonflé d'une manière appréciable avant l'essai à chaud sera refusée.

CIRCULAIRE MINISTÉRIELLE DU 24 DÉCEMBRE 1910

CONCERNANT LA FOURNITURE DES CIMENTS ET CHAUX

Paris, le 24 décembre 1910.

Le Ministre à M..., ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Mon attention a été appelée sur les conditions d'application de la circulaire ministérielle du 2 juin 1902 concernant les fournitures des chaux et ciments, ainsi que sur la rédaction de l'arrêté ministériel et des cahiers des charges-types qu'accompagnait cette circulaire.

1° Modifications de la note sur l'article 2 des cahiers des charges-types

Tout d'abord, il a été soumis une observation en ce qui concerne la rédaction de l'alinéa 2 de la note placée sous l'article 2 de chacun des cahiers des charges n°s 1, 2, 3, 4 et 5.

D'après cet alinéa, lorsqu'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi, et que l'importance de cette fourniture ou la nature du travail l'exige, le cahier des charges doit stipuler que le produit proviendra directement et exclusivement de l'une des usines y désignées ou (comme le prévoient quelques-uns des cahiers des charges-types susvisés), d'autres fournissant couramment des produits que les ingénieurs reconnaissent de qualité au moins égale.

Dans plusieurs projets présentés récemment, et comportant la fourniture de chaux ou de ciments, le devis et cahier des charges des travaux a ainsi prescrit l'emploi d'une marque de chaux ou de ciment déterminé à l'exclusion de toutes les autres.

La Chambre syndicale des fabricants de chaux et ciments a fait remarquer que ces errements sont contraires au principe posé dans les circulaires antérieures, en particulier à celle du 7 mars 1902, et n'a plus sa raison d'être. Elle a demandé en conséquence qu'il ne fût fait à aucune maison une situation privilégiée par une inscription nominative au devis et cahier des charges, et que l'Administration se bornât à réclamer pour les divers liants qu'ils répondent aux conditions de tel ou tel cahier des charges-type.

J'ai reconnu, conformément à l'avis de la commission des chaux et ciments, que la prescription visée est devenue sans objet

en ce qui concerne les liants hydrauliques destinés aux travaux en prise à la mer, auxquels s'appliquent les cahiers des charges types n°s 1 et 2 pour partie les cahiers n°s 4 et 5. Pour ces produits, la note sous l'article 2 devra mentionner que, s'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi du liant, les usines admises à fournir devront être choisies parmi celles qui sont inscrites sur la liste d'admissibilité dressée en vertu de l'arrêté ministériel du 17 février 1906.

En ce qui concerne en général les produits destinés *aux travaux non en prise à la mer*, auxquels s'appliquent le cahier des charges n° 3 et pour partie les cahiers n°s 4 et 5 pour lesquels il n'est prévu aucune liste d'admissibilité, la Commission des chaux et ciments a proposé la suppression du deuxième alinéa susvisé de la note en question, le troisième alinéa suffisant pour réserver le droit de l'Ingénieur d'agréer ou non telle usine proposée par l'entrepreneur adjudicataire avant le commencement des travaux. Toutefois, elle a jugé indispensable de maintenir que, dans le cas d'ouvrages d'une importance considérable tels qu'un viaduc, un mur de réservoir, etc..., et par mesure exceptionnelle dont les Ingénieurs auront à justifier la nécessité dans leurs rapports et propositions, le devis et cahier des charges pourra spécifier que les chaux ou ciments proviendront d'une ou plusieurs usines déterminées qui, dans ce cas, seront désignées à l'article 2 susvisé.

J'ai adopté cet avis de la Commission des chaux et ciments et j'ai décidé de modifier la note inscrite sous l'article 2 de chacun des cahiers des charges-types n°s 1, 2, 3, 4 et 5 du 2 juin 1902 qui sera rédigée dorénavant comme suit :

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 1, *pour les fournitures de ciments Portland destinés à des travaux en prise à la mer*

ARTICLE 2. — Le ciment proviendra directement et exclusivement d (1).

(1) S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l''entrepreneur et agréée par l'Ingénieur ».

Lorsque l'importance exceptionnelle des ouvrages paraîtra aux ingénieurs exiger que l'on précise l'origine du ciment, ils auront à justifier explicitement cette nécessité dans le rapport à l'appui du cahier des charges : en ce cas l'usine ou les usines seront désignées à l'article 2.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 2, *pour la fourniture de chaux hydrauliques destinées à des travaux en prise à la mer*

ARTICLE. 2. — La chaux proviendra directement et exclusivement d (1).

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 3, *pour la fourniture de ciments Portland destinés à des travaux non en prise à la mer*

ARTICLE 2. — Le ciment proviendra directement et exclusivement d (2).

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 4, *pour la fourniture de ciments de grappiers*

ARTICLE 2. — Le ciment proviendra directement et exclusivement d (3).

---

(1) S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l'entrepreneur parmi celles qui sont inscrites sur la liste d'admissibilité dressée en vertu de l'arrêté ministériel du 17 février 1906 ».

(2) S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur. »

Lorsque l'importance exceptionnelle des ouvrages paraîtra aux ingénieurs exiger que l'on précise l'origine du ciment, ils auront à justifier explicitement cette nécessité dans le rapport à l'appui du cahier des charges : en ce cas l'usine ou les usines seront désignées à l'article 2.

(3) *a*) Pour les fournitures destinées à des travaux en prise à mer.

S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l'entrepreneur parmi celles qui sont inscrites sur la liste d'admissibilité dressée en vertu de l'arrêté ministériel du 17 février 1906 ».

b) Pour les fournitures destinées à des travaux non en prise à la mer.

S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur ».

Lorsque l'importance exceptionnelle des ouvrages paraîtra aux ingénieurs exiger que l'on précise l'origine du ciment, ils auront à justifier explicitement cette nécessité dans le rapport à l'appui du cahier des charges ; en ce cas l'usine ou les usines seront désignées à l'article 2.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 5

pour la fourniture de ciments ne rentrant pas dans les catégories pour lesquelles des cahiers des charges spéciaux sont prévus.

ARTICLE 2. — L... proviendra directement et exclusivement d (1).

Le cahier des charges n° 6 joint à la circulaire du 9 novembre 1909 est relatif aux fournitures de chaux hydrauliques destinées aux travaux non en prise à la mer (première catégorie) ne contient pas la note en question et ne comporte donc pas de modification analogue.

2° RAPPEL DES PRESCRIPTIONS DE LA CIRCULAIRE DU 2 JUIN 1902

Mon attention a été appelée par la Commission des chaux et ciments sur l'inobservation fréquente de ces prescriptions dans certains devis et cahiers des charges de travaux qui contiennent en ce qui concerne les chaux et ciments, des stipulations non prévues dans les cahiers des charges-types ou même contraires à leur esprit et à leur lettre.

Je rappelle d'une manière générale aux Ingénieurs la nécessité de se conformer exactement aux prescriptions de la circulaire du 2 juin 1902 qui, actuellement, sont souvent perdues de vue.

3° MODIFICATION DE L'ARRÊTÉ DU 2 JUIN 1902, ET DU CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 6

La Chambre syndicale des fabricants de chaux hydrauliques et ciments du Sud-Est de la France a fait observer que le cahier des

(1) *a*) Pour les fournitures destinées à des travaux en prise à la mer.

S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l'entrepreneur parmi celles qui sont inscrites sur la liste d'admissibilité dressée en vertu de l'arrêté ministériel du 17 février 1906.

b) Pour les fournitures destinées à des travaux non en prise à la mer.

S'il s'agit d'un marché de fourniture : « de l'usine du soumissionnaire ».

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi : « de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'ingénieur ».

Lorsque l'importance exceptionnelle des ouvrages paraîtra aux ingénieurs exiger que l'on précise l'origine du ciment, ils auront à justifier explicitement cette nécessité dans le rapport à l'appui du cahier des charges, en ce cas l'usine ou les usines seront désignées à l'article 2.

charges-type n° 6, ainsi d'ailleurs que l'arrêté ministériel du 2 juin 1902, prévoient pour la fermeture des sacs de chaux ou de ciment un scellement au plomb, alors que depuis quelques années les scellements en tôle d'acier mince tendent à remplacer les anciens plombs de sûreté plus coûteux et plus faciles à défaire et à replacer.

Sur l'avis de la Commission des chaux et ciments, j'ai reconnu le bien fondé de cette observation et j'ai décidé que les mots « scellement au plomb » seront remplacés par l'expression plus générale de « scellement » dans le texte de l'arrêté du 2 juin 1902 (article 2) et du cahier des charges-type n° 6 (article 1).

Le Ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes,

L. Puech.

TABLE DES MATIÈRES PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE

D

E

K

L

M

N

O

P

ERRATA

Page 244, ligne 30 :

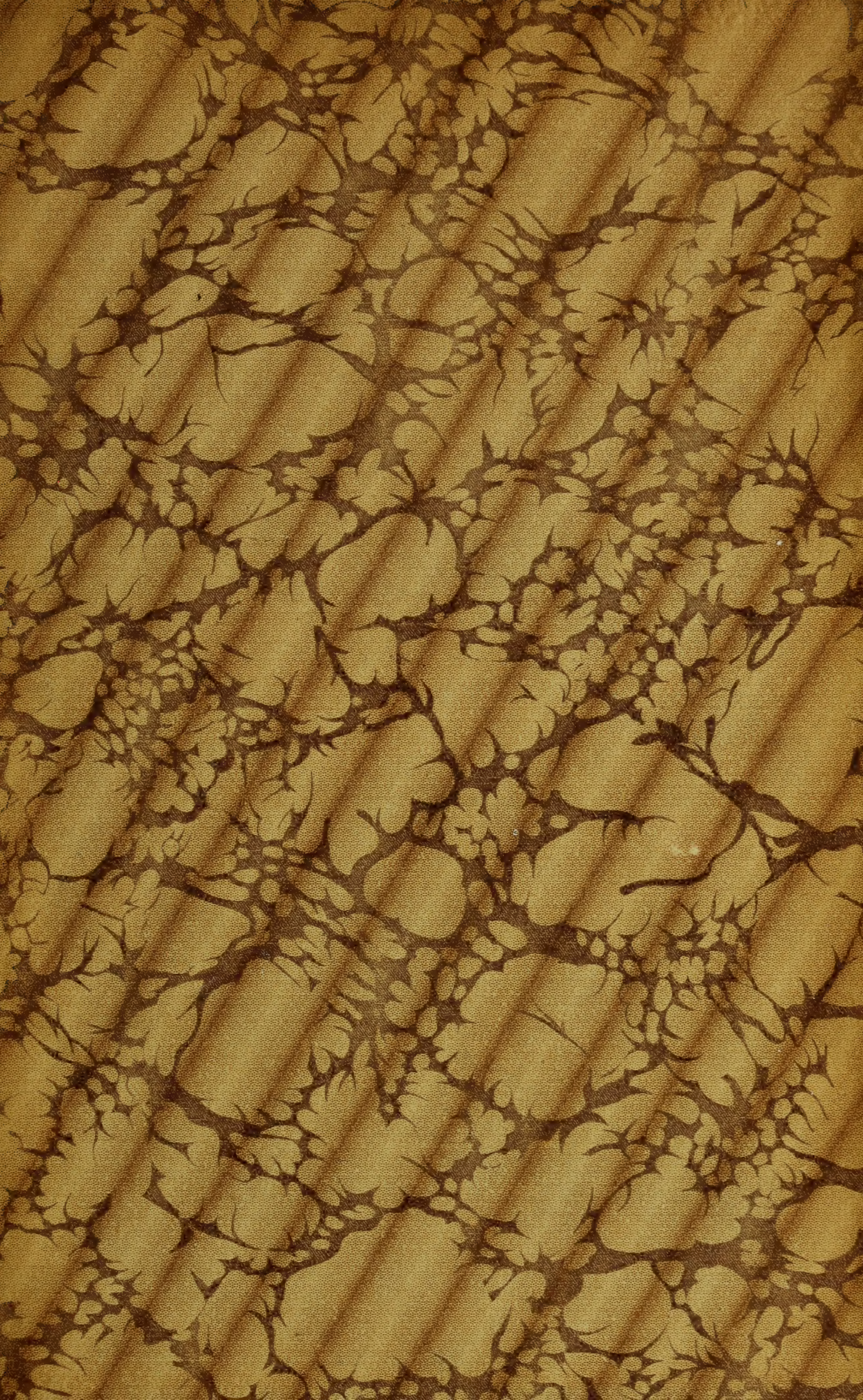
Au lieu de 700,4, lire 708,4.

Page 245, ligne 8 :

Au lieu de $808,4\,x + 81.989 = 9788\,x$,
lire $708,4\,x + 81.989 = 7778\,x$;

$$\text{d'où } x = \frac{81.989}{7069,6} = 11 \text{ kg } 6.$$






UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 070432460